

DESGASTE RADIAL DE REBOLOS DE CBN  
COM APLICAÇÃO DE LUBRIRREFRIGERANTE  
POR TUBEIRA TIPO SAPATA

Gabriel Costa Sousa

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
MECÂNICA**

Gabriel Costa Sousa

**DESGASTE RADIAL DE REBOLOS DE CBN COM  
APLICAÇÃO DE LUBRIRREFRIGERANTE POR TUBEIRA  
TIPO SAPATA**

Dissertação submetida ao Programa de  
Pós-graduação em Engenharia  
Mecânica da Universidade Federal de  
Santa Catarina para a obtenção do  
Grau de Mestre em Engenharia  
Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Walter Lindolfo  
Weingaertner

Florianópolis

2012

Catálogo na fonte elaborada por  
Karla Viviane Garcia Moraes CRB-14/1002

S725 Sousa, Gabriel Costa

Desgaste radial de rebolos de CBN com aplicação de lubrificador por tubeira tipo sapata [dissertação] / Gabriel Costa Sousa ; orientador Walter Lindolfo Weingaertner. - Florianópolis, SC, 2012.

108 p.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Incluiu bibliografia.

1. Engenharia mecânica. 2. Retificação e polimento. 3. Rebolos. 4. CBN. 5. Tubeira tipo sapata. I. Weingaertner, Walter Lindolfo. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

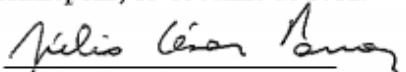
CDU 621

Gabriel Costa Sousa

**DESGASTE RADIAL DE REBOLOS DE CBN COM  
APLICAÇÃO DE LUBRIRREFRIGERANTE POR TUBEIRA  
TIPO SAPATA**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica

Florianópolis, 15 de Junho de 2012.



Prof. Júlio César Passos, Dr.  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**

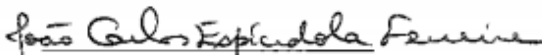


Prof. Walter Lindolfo Weingaertner, Dr.-Ing.  
Orientador

Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Rolf Berndt Schroeter, Dr. Eng.  
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. João Carlos Espíndola Ferreira, Ph.D.  
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof., Jânio Rodrigues Lopes, Dr. Eng.  
Instituto Federal de Santa Catarina



Para meus pais Gorete e Roberto, que me educaram com amor, e cultivaram em mim valores fundamentais à minha formação.

Para meu filhinho Gustavo, que deu um novo sentido à minha vida.

Para minha esposa Karla, que sempre me apoiou em minhas escolhas. Sua ajuda foi importantíssima para a realização do mestrado.



## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Gorete e Roberto, por todos os anos dedicados à minha educação.

À minha esposa Karla pelo companheirismo e compreensão.

Aos meus sogros, Ângela e Carlos, por toda ajuda e acolhida.

Ao Instituto Federal de Santa Catarina (IF-SC), por conceder afastamento parcial e liberar o uso de máquinas e equipamentos, que serviram de apoio à pesquisa.

À Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica (PosMEC), por permitirem a realização do mestrado, gratuito e de excelente qualidade.

Aos técnicos do laboratório USICON, Fernando, Valtair e Paulo e ao técnico do LMP, Hélio, pela colaboração solícita na realização dos ensaios.

Aos professores do DAMM/IF-SC pelo apoio e incentivo, em especial ao Milton Pereira, Marcelo Vandresen, Jânio Lopes e Manoel Alfredo Pereira, pela disposição em discutir sobre o tema e contribuir em sua melhoria.

Ao professor Walter L. Weingaertner, pelo excelente trabalho de orientação, objetivo e seguro.





## RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo avaliar a eficiência de uma tubeira do tipo sapata desenvolvida por Lopes (2007) para ensaios de desgaste radial de um reboło de nitreto de boro cúbico (CBN) na retificação do ferro fundido classe GGG70, mediante aplicação de emulsão lubrificador-refrigerante. Os objetivos específicos são: analisar a influência da fenda entre tubeira e reboło e a influência da vazão de fluido lubrificador-refrigerante sobre o desgaste radial do reboło e a rugosidade da superfície da peça. O trabalho é embasado por uma revisão de literatura sobre a retificação com rebolos, com ênfase aos rebolos de CBN; a distribuição de força e energia na retificação; os fluidos lubrificador-refrigerantes e seus métodos de aplicação; a usinagem do ferro fundido; e a qualidade da superfície usinada. Para avaliar o resultado de trabalho são realizados ensaios de retificação com velocidade de corte de 100 m/s, sem variar os parâmetros de entrada, exceto aqueles relacionados ao sistema de lubrificador-refrigeração. Assim torna-se possível isolar a influência dos parâmetros de corte sobre os resultados do trabalho da influência dos parâmetros de lubrificador-refrigeração. Conclui-se que a tubeira tipo sapata, com a geometria otimizada por Lopes, permite a redução da vazão de fluido lubrificador-refrigerante para valores de até 10 l/min, apresentando uma relação de remoção G de 11526, 42% melhor que os resultados obtidos por Weingärtner (2005). Para um volume retificado de 68135 mm<sup>3</sup>/mm o desgaste radial do reboło de CBN foi de 4,6 µm. A variação dos valores da fenda entre tubeira e reboło no intervalo de 0,3 a 1,0 mm interfere pouco nos resultados de desgaste do reboło e rugosidade da superfície usinada.

**Palavras-chave:** CBN; retificação; tubeira tipo sapata; emulsão; alta velocidade de corte.



## ABSTRACT

This study aims to evaluate the efficiency of a shoe nozzle designed by Lopes (2007) in tests of a grinding wheel radial wear of cubic boron nitride (CBN) grinding on cast iron GGG70, applying water-based emulsion. The specific objectives are: to analyze the influence of the gap between nozzle and wheel and influence of coolant flow rate on the grinding wheel wear and workpiece surface roughness. The work is backed by a literature review on the grinding wheels, emphasizing the CBN grinding wheels; the distribution of power and energy in the grinding; coolants types and supply; the machining of cast iron, and the quality the machined surface. To evaluate the result of work, grinding tests are conducted with cutting speed 100 m/s, without varying the input parameters, except those related to coolant supply. Thus it becomes possible to isolate the influence of the cutting parameters on the results of study of the influence of the parameters of lubrication and cooling. It follows that the shoe nozzle, the geometry optimized by Lopes, allows reducing the coolant flow rate values of up to 10 l / min, with a G-ratio of 11,526, 42% better than the results obtained by Weingärtner (2005). Grinding to a volume of 68,135 mm<sup>3</sup>/mm the radial wear of the CBN wheel was 4.6µm. The variation of the gap between nozzle and the wheel in the range 0.3 to 1.0 mm, little affects the results of grinding wheel wear and roughness of the machined surface.

**Keywords:** CBN; grinding; shoe nozzle; emulsion; high speed grinding.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Descrição de um perfil médio de grão. ....	29
Figura 2 – Retificação cilíndrica externa de mergulho. ....	30
Figura 3 – Zonas de deformação elástica e plástica na formação de cavaco. ....	31
Figura 4 – Influência do atrito na formação do cavaco. ....	32
Figura 5 – Mecanismos de corte na retificação. ....	33
Figura 6 – Principais geometrias de rebolo segundo norma FEPA. ....	34
Figura 7 – Exemplo de designação de rebolo de CBN segundo norma FEPA. ....	35
Figura 8 – Exemplos de rebolos superabrasivos. ....	36
Figura 9 – Tipos de desgaste no grão e ligante. ....	39
Figura 10 – Exemplos de estratégias de alimentação de fluido de corte. ....	44
Figura 11 – Alimentação de fluido de corte: jato livre (esq.) e tubeira sapata (dir.) ....	45
Figura 12 – Escoamento de fluido na região de entrada da tubeira B reta com três canais para fenda variável. ....	46
Figura 13 – Escoamento de fluido para a tubeira A reta de canal simples próximo à superfície do rebolo com variação da abertura da fenda. ....	48
Figura 14 – Ensaio de riscamento com ferro fundido nodular. a) deformação da matriz e nucleação de trinca; b) análise química da ranhura. ....	49
Figura 15 – Retificadora CNC cilíndrica da marca ZEMA. ....	54
Figura 16 – Estratégia de retificação e registro do desgaste do rebolo. ....	58
Figura 17 – Sistema de alimentação e filtragem. ....	59
Figura 18 – Tubeira tipo sapata com três canais retos. ....	60
Figura 19 – Posicionador da tubeira. ....	61
Figura 20 – Sistema de medição de vazão de fluido de corte. ....	63
Figura 21 – Perfil de rugosidade e ondulação do registro de desgaste do rebolo. ....	65
Figura 22 – Bancada para medição de rugosidade. ....	66
Figura 23 – Modelo de código para os corpos de prova. ....	70
Figura 24 – Rugosidade e desgaste radial obtidos nos ensaios 2 e 3. ....	73
Figura 25 – Comportamento da rugosidade (linearizado) como função do volume usinado específico. ....	76
Figura 26 – Rugosidade em função do volume usinado específico. ....	76
Figura 27 – Rugosidade e desgaste radial obtidos nos ensaios 1 e 2. ....	78
Figura 28 – Coeficiente de Thoma e fenda entre tubeira e rebolo em dependência da velocidade de corte para três valores de vazão de fluido. ....	79



## LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 1 – Comportamento do fluido no interior das tubeiras tipo sapata com variação da fenda. ....	47
Tabela 1- Características do rebolo de CBN com ligante vitrificado.....	54
Tabela 2- Características do disco diamantado de dressamento. ....	55
Tabela 3- Composição química para o ferro fundido nodular ABNT NBR 8650/1984 - FE 70002 .....	56
Tabela 4 - Erro máximo das grandezas de entrada .....	62
Tabela 5- Grandezas variáveis por ensaio.....	69
Tabela 6- Codificação dos corpos de prova .....	70
Tabela 7- Pressão do fluido na tubeira em função da vazão. ....	71
Tabela 8- Pressão do fluido na tubeira em função da fenda.....	72
Tabela 9- Desgaste do rebolo em função da vazão. ....	74
Tabela 10- Coeficiente de Thoma obtido em cada ensaio.....	78





## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas  
ANP – Agência Nacional do Petróleo  
ASTM – American Society for Testing and Materials  
 $B_2O_3$  – Óxido Bórico  
 $BCl_3$  – Tricloreto de Boro  
BN – Nitreto de Boro  
C – Carbono  
CBN – Nitreto de Boro Cúbico  
Cu – Cobre  
CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente  
DAMM – Departamento Acadêmico de Metal Mecânica  
DIN – Deutsches Institut für Normung  
Fe – Ferro  
FEPA – Federation of European Producers of Abrasives  
GGG – Globular Grauguss  
 $H_2O$  – Água  
 $H_3BO_3$  – Ácido Bórico  
HCl – Cloreto de Hidrogênio  
IF-SC – Instituto Federal de Santa Catarina  
LMP – Laboratório de Mecânica de Precisão  
Mg – Magnésio  
Mn – Manganês  
 $N_2$  – Gás Nitrogênio  
NBR – Norma Brasileira Regulamentadora  
 $NH_3$  – Amônia  
 $O_2$  – Gás Oxigênio  
P – Fósforo  
S – Enxofre  
SAE – Society of Automobile Engineers  
Si – Silício  
UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina



## LISTA DE SÍMBOLOS

$a$  – penetração de trabalho  
 $a_e$  – largura de corte (paralela ao avanço da ferramenta)  
 $a_{ed}$  – profundidade de dressamento  
 $a_p$  – largura de corte (perpendicular ao avanço da ferramenta)  
 $b_s$  – largura do rebolo  
 $d_{se}$  – diâmetro equivalente do rebolo  
 $d_s$  – diâmetro do rebolo  
 $d_w$  – diâmetro da peça  
 $f_{ad}$  – velocidade de avanço no dressamento  
 $h_{cu}$  – espessura de usinagem  
 $h_{cu,eff}$  – espessura de corte efetiva  
 $k$  – fator de proporcionalidade  
 $l_k$  – comprimento de contato  
 $n$  – tamanho da amostra  
 $n_w$  – rotação da peça  
 $q$  – relação de velocidades  
 $q_d$  – relação de velocidades no dressamento  
 $s$  – desvio padrão da amostra  
 $t$  – distribuição de Student  
 $t$  – tonelada métrica  
 $t_{p,20}$  – comprimento do perfil de rolamento  
 $t_{\sigma v}$  – coeficiente de Student  
 $v_{fl}$  – velocidade do fluido lubrificadorrefrigerante  
 $v_{fr}$  – velocidade de avanço frontal  
 $v_s$  – velocidade de corte  
 $v_w$  – velocidade tangencial da peça  
 $\bar{x}$  – média da amostra  
 $\alpha$  – constante experimental  
 $\alpha$  – ângulo de incidência  
 $\alpha$  – confiabilidade  
 $\beta$  – constante experimental  
 $\gamma$  – constante experimental  
 $\gamma$  – ângulo de saída  
 $\mu$  – relação da força de usinagem  
 $\rho$  – massa específica (densidade)  
 $\rho_s$  – raio do gume  
 $\sigma$  – coeficiente (fator) de Thoma  
 $\nu$  – graus de liberdade

$A_s$  – área da fenda de trabalho  
 $C_{stat}$  – número de gumes estáticos  
 $F_{n,s}$  – força normal à direção de corte  
 $F_{t,s}$  – força tangencial à direção de corte  
 $G$  – relação de remoção  
 $K_{100}$  – dureza Knoop (pré-carga de 100kg)  
 $P_0$  – pressão medida  
 $P_{sat}$  – pressão de saturação do líquido  
 $Q_{fl}$  – vazão de fluido lubrificador  
 $Q'_{fl}$  – vazão específica de fluido lubrificador  
 $R_a$  – desvio médio aritmético da rugosidade  
 $R_{t,s}$  – rugosidade efetiva  
 $R_z$  – profundidade média da rugosidade  
 $S$  – grau de afiação  
 $T_\mu$  – profundidade de início de corte  
 $U_d$  – grau de recobrimento  
 $V_w$  – volume usinado  
 $V'_w$  – volume usinado específico  
 $W_t$  – ondulação máxima da rugosidade  
 $Z'_w$  – taxa de remoção específica  
 $\Delta_{rs}$  – desgaste radial do rebolo

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>23</b>
1.1 OBJETIVOS .....	24
1.1.1 Objetivo Geral.....	24
1.1.2 Objetivos Específicos .....	24
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>27</b>
2.1 RETIFICAÇÃO COM REBOLOS .....	27
2.1.1 Embasamento cinemático.....	27
2.1.2 Retificação cilíndrica externa de mergulho .....	30
2.2 DISTRIBUIÇÃO DE FORÇA E ENERGIA NA RETIFICAÇÃO .....	30
2.3 REBOLOS DE NITRETO DE BORO CÚBICO.....	34
2.3.1 Propriedades do nitreto de boro cúbico .....	37
2.3.2 Mecanismos de desgaste dos rebolos de nitreto de boro cúbico .....	38
2.3.3 Preparação dos rebolos de nitreto de boro cúbico .....	40
2.4 MEIOS LUBRIRREFRIGERANTES .....	41
2.4.1 Meios lubrirrefrigerantes emulsionáveis em água .....	42
2.4.2 Sistemas de aplicação de fluidos lubrirrefrigerantes .....	43
2.5 COMPORTAMENTO DO FLUIDO NO INTERIOR DA TUBEIRA TIPO SAPATA.....	45
2.6 FERRO FUNDIDO NODULAR .....	48
2.6.1 Usinabilidade dos ferros fundidos nodulares .....	49
2.7 QUALIDADE DA SUPERFÍCIE USINADA .....	50
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>53</b>
3.1 TIPO DE PROCESSO DE RETIFICAÇÃO.....	53
3.2 MÁQUINA-FERRAMENTA.....	53
3.3 FERRAMENTA DE CORTE .....	54
3.4 FERRAMENTA DE DRESSAMENTO.....	55
3.5 MATERIAL ENSAIADO .....	56

<b>3.5.1</b>	<b>Corpos de prova.....</b>	<b>57</b>
<b>3.6</b>	<b>FLUIDO LUBRIRREFRIGERANTE .....</b>	<b>58</b>
<b>3.6.1</b>	<b>Sistema de alimentação e filtragem .....</b>	<b>58</b>
<b>3.6.2</b>	<b>Tubeira tipo sapata.....</b>	<b>59</b>
<b>3.6.3</b>	<b>Sistema de posicionamento da tubeira .....</b>	<b>60</b>
<b>3.7</b>	<b>VERIFICAÇÃO DAS GRANDEZAS DE ENTRADA .....</b>	<b>61</b>
<b>3.7.1</b>	<b>Grandezas relacionadas à máquina-ferramenta .....</b>	<b>62</b>
<b>3.7.2</b>	<b>Vazão do fluido lubrirrefrigerante.....</b>	<b>62</b>
<b>3.7.3</b>	<b>Rigidez do sistema de posicionamento da tubeira.....</b>	<b>63</b>
<b>3.8</b>	<b>GRANDEZAS PARA AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DE TRABALHO .....</b>	<b>63</b>
<b>3.8.1</b>	<b>Desgaste radial do reboło .....</b>	<b>64</b>
<b>3.8.2</b>	<b>Rugosidade da peça .....</b>	<b>65</b>
<b>4</b>	<b>PLANEJAMENTO E EXECUÇÃO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>69</b>
<b>4.1</b>	<b>VARIAÇÃO DA VAZÃO DE FLUIDO LUBRIRREFRIGERANTE .....</b>	<b>70</b>
<b>4.2</b>	<b>VARIAÇÃO DA FENDA DE TRABALHO .....</b>	<b>71</b>
<b>5</b>	<b>APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>73</b>
<b>5.1</b>	<b>INFLUÊNCIA DA VAZÃO DE LUBRIRREFRIGERANTE SOBRE O DESGASTE RADIAL DO REBOLO E A RUGOSIDADE DA PEÇA .....</b>	<b>73</b>
<b>5.2</b>	<b>INFLUÊNCIA DA FENDA DE TRABALHO SOBRE O DESGASTE RADIAL DO REBOLO E A RUGOSIDADE DA PEÇA.....</b>	<b>77</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>81</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>85</b>
	<b>APÊNDICE A –Dimensões dos corpos de prova.....</b>	<b>91</b>
	<b>APÊNDICE B – Gráficos dos perfis brutos e filtrados do registro de desgaste .....</b>	<b>93</b>
	<b>APÊNDICE C – Valores de rugosidade medidos em todas as regiões usinadas.....</b>	<b>101</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Grande parte do calor gerado na usinagem com ferramentas de geometria não definida é absorvida pela peça. Isto pode resultar em defeitos como tensões residuais de tração, micro trincas, oxidação (aspecto colorido), alteração da microestrutura, revenimento, entre outros. Em peças de aplicação de engenharia, estes defeitos podem comprometer muito sua qualidade, reduzindo, por exemplo, sua resistência à fadiga. O problema pode ser ainda agravado com a utilização de velocidades de corte altas, na ordem de 100 m/s. A geração de calor também pode afetar a estrutura do rebolo, acelerando sua degradação. Especialmente na retificação com rebolos de CBN, em que o custo da ferramenta é muito alto, a postergação do seu descarte traz vantagens econômicas.

Um dos meios de reduzir os efeitos prejudiciais do calor é retirá-lo da interface rebolo peça através de um meio lubrirrefrigerante. No entanto a rotação do rebolo tende a formar sobre sua própria superfície uma barreira aerodinâmica (colchão de ar) através do arrasto gerado pela textura dos grãos abrasivos. Este colchão de ar faz com que o jato de fluido de corte seja desviado da região de corte, reduzindo assim a eficiência da refrigeração. Para vencer a barreira aerodinâmica é necessário que o fluido seja injetado com velocidade igual ou superior à periférica do rebolo, demandando maiores volumes de fluido e maiores potências para acionamento do sistema de bombeamento.

Weingärtner (2005), em seu trabalho de mestrado, comprovou a eficiência do uso de tubeiras tipo sapata para direcionamento do fluido à região de usinagem. Este tipo de tubeira, por princípio de funcionamento, afasta a camada de ar que é arrastada pelo rebolo e direciona melhor o jato, reduzindo seu espalhamento. Em sua pesquisa foi possível verificar a grande redução do faiscamento, mesmo utilizando menores volumes de fluido. Seu trabalho foi direcionado à retificação de ferro fundido nodular, devido à parceria que havia com uma fábrica de motores, a qual utiliza este material para fabricação de virabrequins.

Motivado pelos bons resultados obtidos por Weingärtner, Lopes (2007) pesquisou, em sua tese de doutorado, quatro diferentes modelos de tubeira tipo sapata, variando a geometria dos canais de condução. Seu trabalho consistiu em analisar o comportamento do fluxo no interior das tubeiras e, através dele, pôde concluir que a tubeira com três canais retos gerou a melhor condição de escoamento.

Nas seções seguintes serão apresentados a revisão bibliográfica, a metodologia empregada e o planejamento experimental. Na análise dos



resultados será visto que o aperfeiçoamento da geometria interna da tubeira, para aplicação de fluido lubrificador, melhora os resultados de desgaste radial do rebolo, assim como a combinação dos parâmetros de entrada relativos ao sistema de lubrificação levam à redução da quantidade de fluido necessária.

## 1.1 OBJETIVOS

O processo de retificação, especialmente com velocidade de corte alta com superabrasivos, ainda necessita de muito desenvolvimento tecnológico, tamanhas as dificuldades em se estudar os fenômenos que ocorrem durante a formação do cavaco. Dentro deste contexto, os meios lubrificantes apresentam um papel muito importante na lubrificação do corte e refrigeração da peça e ferramenta. As pesquisas feitas sobre o uso de tubeias tipo sapata na retificação com CBN direcionam a aplicação com óleo integral. As emulsões apresentam muitas vantagens sobre o óleo integral, principalmente por sua filtragem ser mais simples e por não apresentar risco de incêndio. Nesta pesquisa, os objetivos são voltados para a análise da eficiência da tubeira sapata com uso de emulsões na redução do desgaste do rebolo de CBN.

### 1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa é analisar a influência dos parâmetros da regulação geométrica de uma tubeira otimizada por Lopes (2007), bem como os parâmetros de vazão do lubrificante sobre o desgaste radial de um rebolo vitrificado de CBN, retificando ferro fundido nodular perlítico. Para isso será utilizada como meio lubrificante uma emulsão de 5% de óleo em água.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos orientam a pesquisa para que se alcance o resultado esperado, e são:

- a) Estabelecer a faixa de abertura da fenda de trabalho para a qual a lubrificação é eficiente;
- b) Verificar a influência da vazão sobre o desgaste do rebolo;
- c) Validar a utilização da tubeira sapata com três canais retos, desenvolvida por Lopes (2007);

- d) Verificar a influência dos parâmetros de entrada avaliados sobre a rugosidade da superfície retificada;
- e) Elaborar uma metodologia para a seleção dos parâmetros de lubrificação que conduzam ao menor desgaste radial do rebolo possível, com utilização dos materiais apresentados aqui.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para desenvolvimento da pesquisa e entendimento dos fenômenos que ocorrem durante a retificação com tubeira do tipo sapata, será apresentada uma revisão de literatura sobre processo de retificação, rebolos superabrasivos e métodos de lubrificação.

### 2.1 RETIFICAÇÃO COM REBOLOS

Retificação é um processo de usinagem que utiliza como ferramenta de corte grãos abrasivos unidos por um material ligante. Estes grãos abrasivos são obtidos por processo de moagem de materiais duros e frágeis (naturais ou sintéticos) que são quebrados de maneira irregular, formando gumes e quinas de geometria não definida. Por esta razão, retificação é classificada como um processo de usinagem com ferramenta de corte de geometria não definida (NORMA DIN 8589, *apud* KLOCKE, 2009), ou ainda como processo de usinagem por abrasão (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1971).

Dentre os processos de usinagem, o processo de retificação vem ocupando posição de destaque graças aos avanços tecnológicos obtidos na construção das máquinas-ferramentas e ferramentas de corte. Até o final da década de 1990, das máquinas distribuídas nos parques fabris, 42% eram retificadoras. Embora os processos que utilizam ferramentas de geometria definida, sob condições normais<sup>1</sup>, permitam taxas de remoção de material muito maiores, não são capazes de produzir peças com a mesma precisão geométrica e dimensional, tampouco obter a mesma qualidade da superfície (DROZDA; WICK, 1983), (TÖNSHOFF *et al*, 1998).

O processo de retificação pode se caracterizado por seus parâmetros de entrada, primários ou secundários, e por suas grandezas de sistema, como força de corte, desgaste do rebolo, potência e temperatura. A interação entre parâmetros de entrada e grandezas de sistema influenciam o resultado do trabalho, sob o ponto de vista tecnológico e econômico (KÖNIG, 2002).

#### 2.1.1 Embasamento cinemático

No processo de retificação, a remoção de material ocorre por um número muito grande de gumes micrométricos, os quais possuem

---

<sup>1</sup> Exceto os processos de corte de ultraprecisão como, por exemplo, usinagem de microchips.

geometria não definida e são distribuídos aleatoriamente na estrutura do rebolo (KÖNIG, 2002). Os grãos permanecem fixados no rebolo por meio de um material ligante e, quando se encontram nas regiões limites do rebolo, apresentam protusões variadas. De acordo com Verkerk *apud* Doman *et al* (2005), o grão abrasivo pode apresentar múltiplos gumes, porém os gumes adjacentes podem ser considerados como um único gume, por serem incapazes de atuarem no corte do material.

Dada a natureza estocástica da distribuição dos gumes, torna-se difícil determinar suas posições e geometrias, da mesma forma o modo como os gumes realizarão o corte (MARINESCU *et al*, 2007). No entanto, segundo Klocke (2009), por meio de dispositivos apalpadores é possível avaliar a superfície topográfica do rebolo e estabelecer a forma média dos gumes. Com base nesta informação calcula-se a espessura de usinagem média ( $h_{cu}$ ), conforme equação (2.1).

$$h_{cu} \approx k \times \left[ \frac{1}{C_{stat}} \right]^a \times \left[ \frac{v_w}{v_s} \right]^\beta \times \left[ \frac{a}{d_{se}} \right]^\gamma \quad (2.1)$$

Na retificação de peças cilíndricas o comprimento de contato entre rebolo e peça varia de acordo com o diâmetro de ambos. Com a equação (2.2) calcula-se o diâmetro equivalente do rebolo ( $d_{se}$ ), que resultará num comprimento de contato ( $l_k$ ), de forma análoga à retificação plana, onde o diâmetro equivalente é igual ao diâmetro efetivo. O sinal positivo no denominador aplica-se para retificação cilíndrica externa, ao passo que o negativo, para retificação cilíndrica interna (KÖNIG, 2002). Os diâmetros da peça e rebolo são representados por ( $d_w$ ) e ( $d_s$ ), respectivamente.

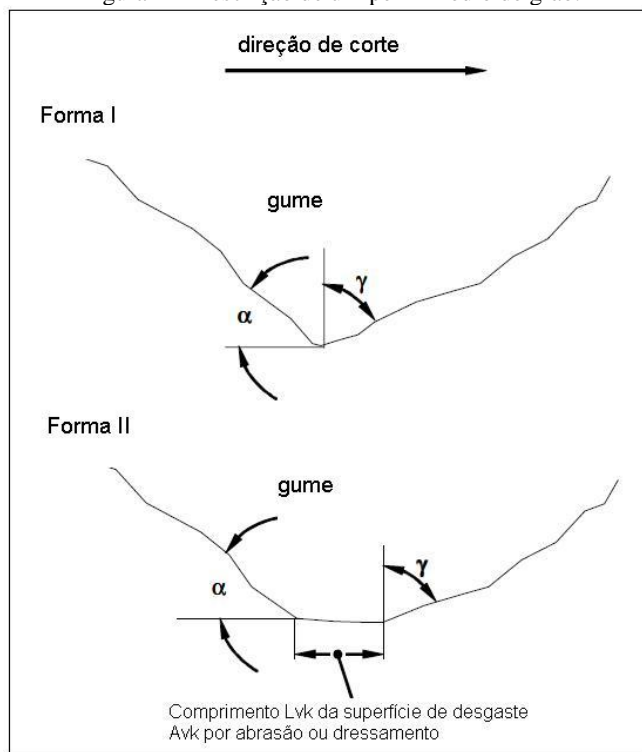
$$d_{se} = \frac{d_w \cdot d_s}{d_w \pm d_s} \quad (2.2)$$

O aumento no comprimento de contato ( $l_k$ ), calculado pela equação (2.3), é resultante do aumento do diâmetro equivalente do rebolo ( $d_{se}$ ) e leva a menores espessuras de usinagem ( $h_{cu}$ ), desde que se mantenha constante a taxa de retificação ( $Z$ ) (KÖNIG, 2002).

$$l_k = \sqrt[3]{d_{se} \cdot Z} \quad (2.3)$$

Devido ao desgaste do gume durante a usinagem, normalmente surge uma superfície de desgaste na zona mais protuberante do grão (figura 1), gerando uma condição de atrito semelhante à obtida no flanco de uma ferramenta de torneamento. Pesquisas indicam que a forma média dos gumes se assemelha a uma cunha cujo ângulo de saída é da ordem de  $\gamma = -80^\circ$  (KÖNIG, 2002).

Figura 1 – Descrição de um perfil médio de grão.



Fonte: Klocke (2009).

O grau de afiação  $S$  do gume pode ser obtido pelo quociente entre a espessura de usinagem ( $h_{cu}$ ) e o raio aproximado do gume  $\rho_s$ , conforme a equação (2.4).

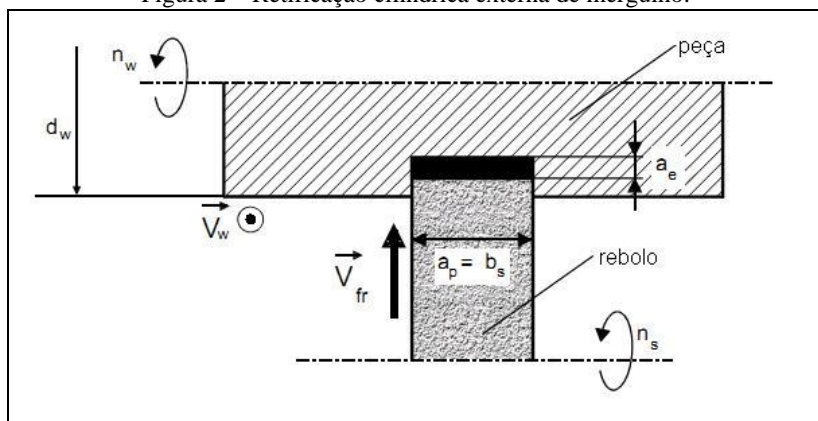
$$S = \frac{h_{cu}}{\rho_s} \quad (2.4)$$

Esta relação normalmente é muito baixa, o que representa um baixo grau de afiação. Tal característica faz com que a energia necessária para remoção de material seja muito mais alta que em processos de usinagem com ferramenta de geometria definida.

### 2.1.2 Retificação cilíndrica externa de mergulho

Na retificação cilíndrica externa de mergulho o movimento relativo entre rebolo e peça ocorre apenas no sentido transversal do eixo da peça. Assim, a largura de corte é igual à largura do rebolo, ou largura efetiva do rebolo. Este método é normalmente empregado para retificação de virabrequins, assentos de rolamento e canais (KLOCKE, 2009). A figura 2 mostra esquematicamente o método e as grandezas envolvidas.

Figura 2 – Retificação cilíndrica externa de mergulho.



Fonte: Klocke (2011).

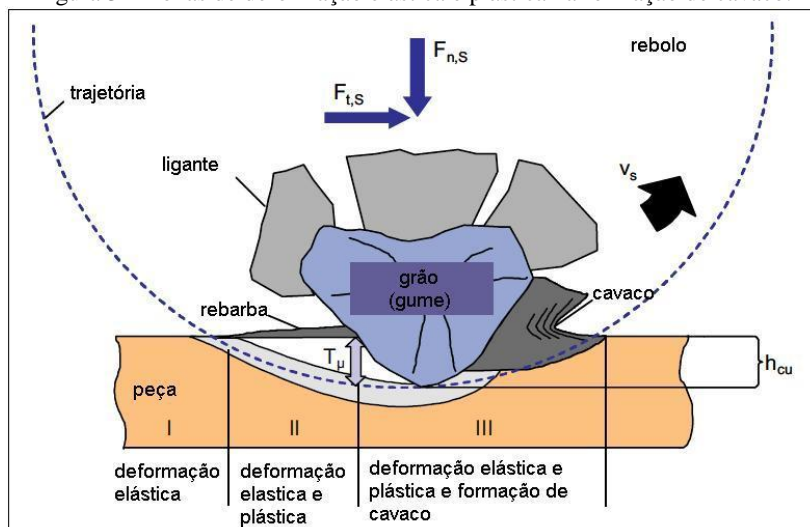
## 2.2 DISTRIBUIÇÃO DE FORÇA E ENERGIA NA RETIFICAÇÃO

Durante o processo de retificação, os grãos abrasivos penetram no material da peça, com velocidade e trajetória definidas, de modo que a direção e sentido das forças que atuam sobre cada grão sejam conhecidos. A força de corte pode ser dividida em duas componentes, uma tangencial à direção de corte, chamada ( $F_{t,s}$ ) e outra normal à direção de corte, denominada ( $F_{n,s}$ ) (KÖNIG, 2002). Pela análise das forças que

atuam momentaneamente sobre o gume e do comportamento do processo é possível interpretar o resultado do trabalho, em termos de qualidade da peça e desgaste do rebolo, por exemplo. Enquanto que a força tangencial traz informações sobre a potência consumida e a energia necessária para remover uma determinada quantidade de material, a força normal reflete sobre a qualidade da superfície retificada, dimensional e geométrica da peça. Em estudo sobre detecção de vibração de usinagem na retificação, Govekar *et. al* (2002) mediram a oscilação da força normal ( $F_{n,s}$ ) como parâmetro para determinação da vibração do processo.

Analisando um gume isoladamente durante a penetração no material da peça, podem ser distinguidas três regiões principais, de acordo com a figura 3 (KLOCKE, 2009). No início da penetração do gume ocorrem apenas deformações elásticas no material da peça e a força normal é maior que a força tangencial. À medida que o gume penetra na peça e o cavaco começa a ser formado, ocorre uma diminuição da força normal e um aumento na força tangencial, levando a um aumento da relação de força de usinagem ( $\mu$ ). Esta relação é dada pela razão entre ( $F_{t,s} / F_{n,s}$ ) (KÖNIG, 2002).

Figura 3 – Zonas de deformação elástica e plástica na formação de cavaco.



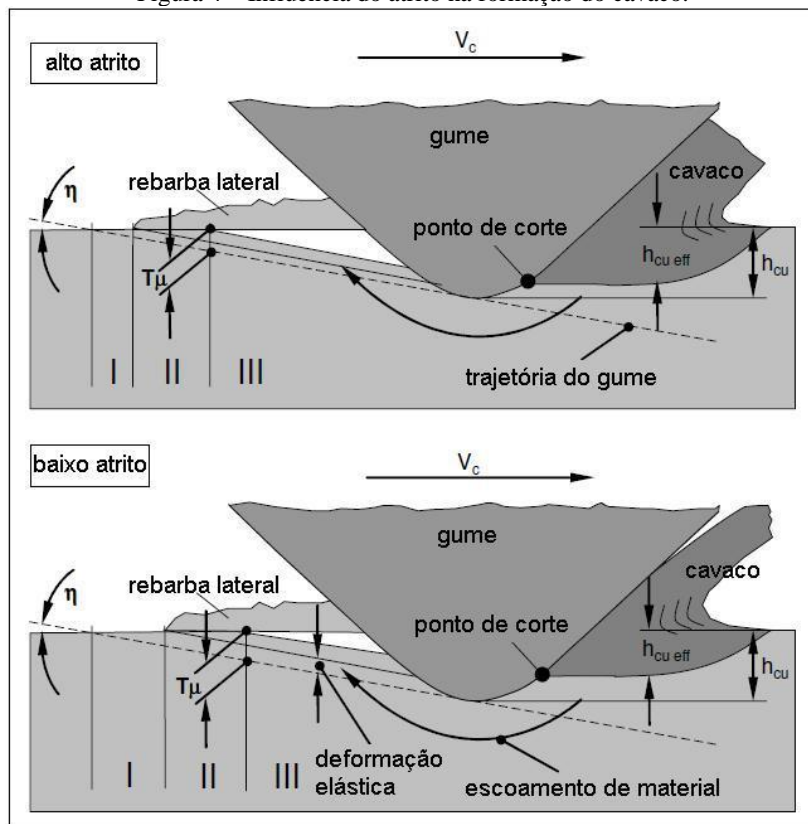
Fonte: Klocke (2009).

Os parâmetros que favorecem a formação do cavaco levam a um aumento de ( $F_{t,s}$ ), enquanto que os parâmetros que elevam a penetração



de início de corte ( $T_\mu$ ) tendem a aumentar  $F_{n,s}$ . O atrito entre o gume e o material é o principal fator de influência sobre a formação de cavaco. O aumento do atrito favorece a formação do cavaco pela diminuição da penetração de início de corte  $T_\mu$ , para uma determinada espessura de corte ( $h_{cu}$ ) - nesta condição observam-se cavacos com maiores espessuras. Já o contrário leva a um maior valor de  $T_\mu$ , logo se aproveita menos a penetração do gume na formação do cavaco. A formação do cavaco também é influenciada pelo raio de gume  $\rho_s$ , lubrificação, condições de escoamento do material, velocidade de corte e ângulo de ação do gume (KÖNIG, 2002). A figura 4 mostra a influência destes parâmetros sobre a formação de cavaco.

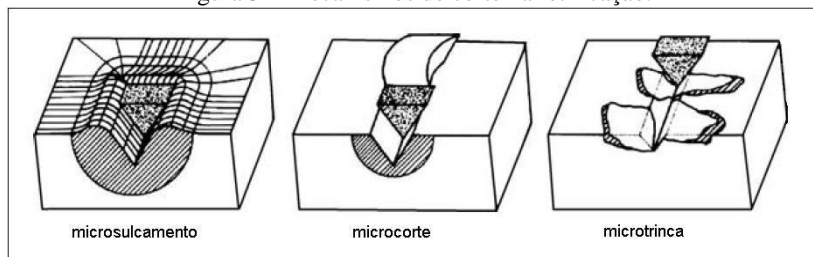
Figura 4 – Influência do atrito na formação do cavaco.



Fonte: Klocke (2009).

Tkaya *et al.* (2009) em ensaios de riscamento com indentadores cônicos, variaram o ângulo dos indentadores e a força normal aplicada sobre eles e verificou que a relação de forças aumenta à medida que ocorre transição de deformação plástica para corte. Para uma mesma força normal, a diminuição do ângulo do cone (cones mais agudos) resulta em valores mais altos de relação de forças, pois a formação de cavaco é iniciada mais cedo. Na figura 5 observam-se os principais mecanismos de usinagem durante a retificação.

Figura 5 – Mecanismos de corte na retificação.



Fonte: Zum *apud* Guesser (2009).

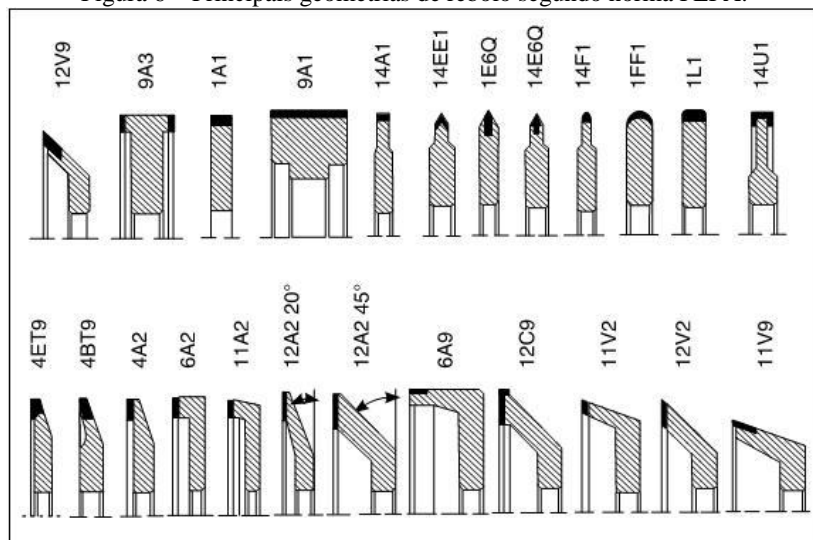
O uso de emulsões ou óleo integral eleva a profundidade de início de corte, pois favorece o escoamento de material e o mecanismo plástico predominante é o de microsulcamento. Entretanto, para grandes seções de ranhura, a lubrificação diminui a influência do atrito sobre a força tangencial, reduzindo, assim, a energia necessária para realizar o corte (KLOCKE, 2009).

Analizando o processo de retificação macroscopicamente, observa-se que ocorrem fenômenos tribológicos no sistema composto por reboło, peça, meio lubrificador e o meio que os envolve (ar). O mecanismo de usinagem mais presente é o de mecanismo abrasivo. As condições severas de atrito, principalmente ocasionadas por atrito deslizante, fazem com que a temperatura no processo seja crítica, a ponto de comprometer a integridade da superfície e subsuperfície da peça (BRINKSMEIER *et al.*, 1999; GUO *et al.*, 2007). Deste modo, o atrito é sempre associado à dissipação de energia. A energia mecânica é introduzida na zona de contato (penetração do gume), resultando em deformação; em seguida esta energia é transformada através de deformações elásticas e plásticas, sulcamento e adesão; por fim a energia é dissipada na forma de calor, geração de defeitos e emissões (acústicas e térmicas) (STOLARSKI, 1990; BRINKSMEIER *et al.*, 2006).

## 2.3 REBOLOS DE NITRETO DE BORO CÚBICO

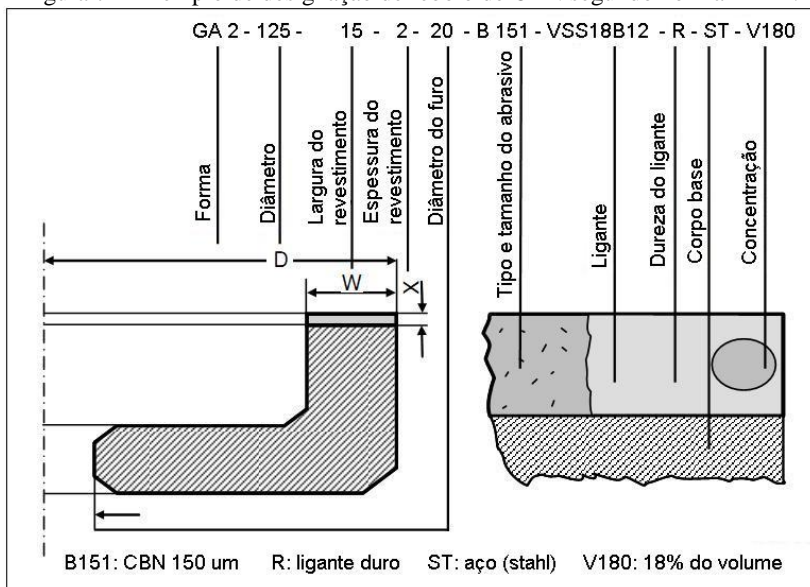
Segundo a norma DIN 69 111, rebolos são ferramentas rotativas constituídas de ligante, abrasivo e poros e suas propriedades são determinadas pelo tipo, tamanho e concentração do grão abrasivo, assim como do tipo e porosidade do ligante. Os rebolos de CBN e diamante, em contraste aos rebolos convencionais, são normalmente construídos em um corpo base revestidos de uma fina camada abrasiva, pois a alta resistência ao desgaste destes materiais garante longa vida da ferramenta. A norma FEPA classifica os rebolos de acordo com a geometria, tipo e tamanho de grão. A figura 6 mostra geometrias de rebo, de acordo com a norma FEPA e na figura 7 é apresentado um exemplo de designação de rebo superabrasivo.

Figura 6 – Principais geometrias de rebo segundo norma FEPA.



Fonte: Winter (2009).

Figura 7 – Exemplo de designação de rebolo de CBN segundo norma FEPA.



Fonte: Klocke (2009) (adaptado).

O desenvolvimento de novos abrasivos sintéticos convencionais e dos superabrasivos tem possibilitado a aplicação de velocidades de corte cada vez mais altas, resultando em aumento da taxa de retificação de 10 a 100 vezes. A partir da década de 1990, velocidades acima de 80 m/s foram consideradas como altas (MARINESCU et al, 2007). Na figura 8 são apresentados alguns exemplos de rebolos superabrasivos. De acordo com as características desejadas do rebolo, além da escolha do abrasivo é importante selecionar corretamente o ligante, principalmente em retificação de velocidade de corte alta. De um modo geral, grãos maiores e mais protuberantes e estrutura mais aberta favorecem condições de corte mais agressivas, como em operações de desbaste (KLOCKE, 2009).

O ligante tem a função principal de unir os grãos abrasivos individualmente à estrutura do rebolo, porém deve permitir que eles se desprendam quando apresentarem desgaste acentuado. Isto garante uma característica de auto-afiação do rebolo. A porosidade do ligante também é uma característica importante, pois os poros auxiliam no transporte do fluido lubrificante-refrigerante à zona de corte e armazenam temporariamente o cavaco no momento do corte. Os ligantes são classificados em vitrificados, resinóides e metálicos (KLOCKE, 2009).

Figura 8 – Exemplos de rebolos superabrasivos.



Fonte: Krebs e Riedel (2006).

Os ligantes vitrificados (ou cerâmicos) são compostos basicamente de argilas, quartzo, feldspato e fundentes. Suas principais vantagens são: estabilidade a temperaturas elevadas, estabilidade química, comportamento frágil, boa resistência mecânica e capacidade de apresentar poros (até 55% do volume). Estas características permitem a obtenção de excelentes taxas de remoção. Ligantes resinóides são compostos de resinas sintéticas e apresentam boa flexibilidade e baixa porosidade – são normalmente empregados em discos de corte ou em rebolos para operações de acabamento. Já os ligantes metálicos podem ser compostos de diferentes metais e produzidos por eletrodeposição ou brasagem, sendo que são mais aplicados em retificação de materiais frágeis como vidros e cerâmicas (KÖNIG, 2002; VENKATESH; IZMAN, 2007; DROZDA; WICK, 1983).

Jackson *et al* (2001) relatam problemas relacionados aos ligantes e apontam o ligante vitrificado como mais vantajoso, devido a sua alta resistência ao desgaste e possibilidade de ajuste da porosidade. Segundo Guo *et al* (1999), na retificação com rebolos vitrificados de CBN a transferência de energia para a peça é de 8,5%, enquanto que com rebolos resinóides é de 20%. Mesmo o CBN sendo bom condutor térmico, a ausência de poros nos rebolos resinóides torna insignificante o efeito de refrigeração do fluido lubrificador. Também as condições de dressamento são mais simples para rebolos vitrificados e, na maioria das vezes, se podem dispensar operações de afiação posteriores.

### 2.3.1 Propriedades do nitreto de boro cúbico

O nitreto de boro cúbico (CBN) é um material sintético, criado em 1957 por R. H. Wentorf e produzido industrialmente pela empresa U.S. General Electric desde 1968. É considerado um super-abrasivo, principalmente por sua alta dureza – o segundo material mais duro depois do diamante. Reúne algumas vantagens em relação a outros abrasivos, principalmente na retificação de materiais ferrosos e de difícil usinagem, como os aços rápidos, pois apresenta alta resistência ao desgaste e boa estabilidade química sob altas temperaturas (KLOCKE, 2009).

O BN é produzido a partir do cloreto de boro e amônia - a reação química é mostrada na equação 2.5. A partir do BN é produzido o CBN a pressões entre 50 e 90 kbar e temperaturas entre 1800°C e 2700°C.



Apresenta uma dureza Knoop  $K_{100} = 4700$ , o que é muito superior aos abrasivos convencionais, porém inferior ao diamante. O diamante deixa de ser estável a 900°C, enquanto que o CBN somente se degrada a temperaturas superiores a 2000°C (KÖNIG, 2002). Outra vantagem do CBN em relação ao diamante é sua baixa afinidade com o carbono, o que o torna muito indicado para retificação de aços e ferros fundidos.

Em situações típicas de retificação, podem ser atingidas temperaturas altas na região de corte. Sob altas temperaturas podem ocorrer reações químicas entre o CBN e o meio (ar ou água). Acima de 1200°C em ar seco, ocorre uma reação de oxidação na superfície do grão que forma uma camada de alta resistência inibidora de desgaste, conforme equação 2.6.



Já na presença de vapor d'água, acima de 1000°C, inicia-se uma reação de hidrólise de acordo com a equação 2.7. Como consequência não se forma uma camada de óxido protetora, mas ocorre surgimento de trincas e perda de massa (CELY *apud* KLOCKE, 2009).



Esta reação leva à degradação prematura dos gumes. Para evitar a degradação dos gumes na presença de vapor de água superaquecido durante a usinagem, é necessário manter-se a temperatura baixa e por isto, no emprego de uma emulsão de óleo em água, é muito importante que a zona de corte seja completamente inundada por fluido lubrificador.

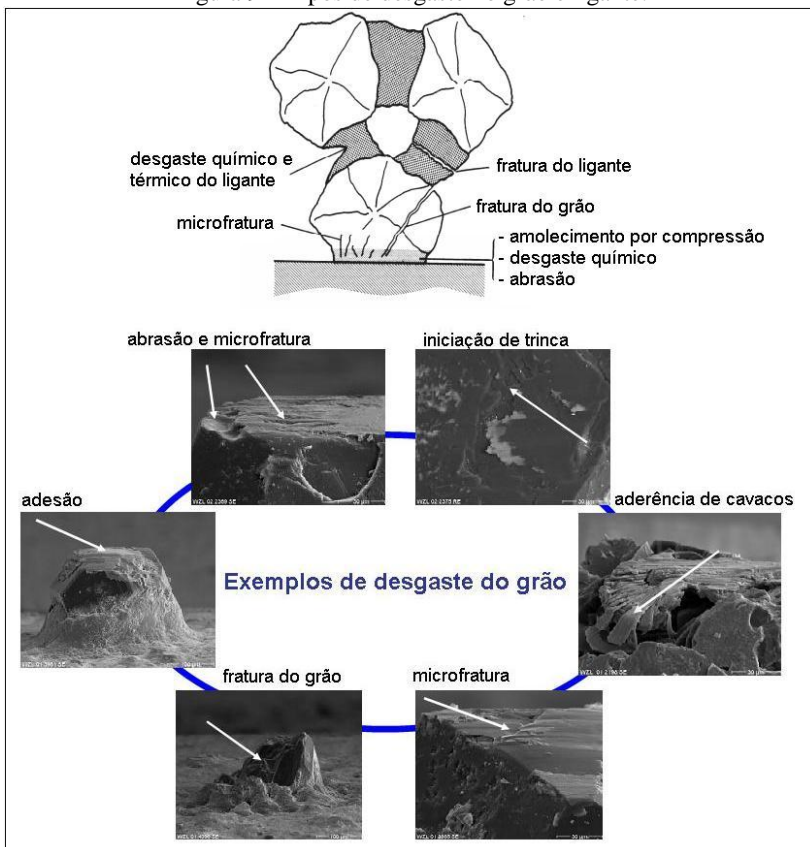
### **2.3.2 Mecanismos de desgaste dos rebolos de nitreto de boro cúbico**

Durante o processo de retificação, o rebolo está em constante atrito com a peça e isto gera um desgaste tribológico, tanto do grão abrasivo como do ligante. O resultado do desgaste do rebolo é diretamente observado na redução contínua de seu diâmetro e no arredondamento do seu raio de quina (HERMAN; KRZOS, 2009). A figura 9 mostra os principais mecanismos de desgaste do rebolo.

Fujimoto e Ichida (2008) observaram que, durante a retificação de aço rápido com rebolo vitrificado de CBN, os mecanismos de desgaste do gume se alternam à medida que a remoção de material progride. No início da retificação ocorre desgaste abrasivo no gume e cegamento do mesmo pela criação de um plano platfórmico. Então as forças sobre o gume aumentam levando à microfratura e formação de novos gumes afiados, que novamente se desgastarão por atrito. No momento em que o grão perde sua capacidade de corte por alteração de sua geometria, os esforços sobre ele podem levar a uma macrofratura ou mesmo ao seu arancamento completo. Em situações mais críticas a fratura pode se estender ao ligante removendo uma rede de grãos (KÖNIG, 2002).

A forma como ocorre a fratura no grão também depende de sua microestrutura. Nos grãos monocristalinos as trincas se propagam em um único plano de clivagem, levando à remoção de lascas maiores, enquanto que em grãos policristalinos a trinca pode ser bifurcada em mais planos, resultando numa fratura mais irregular, porém gerando menores lascas (D'EVELYN; TANIGUCHI, 1999). Algo semelhante ocorre nos ligantes vitrificados, porém o que determina a forma da fratura é a presença de uma fase cristalina específica de acordo com a composição.

Figura 9 – Tipos de desgaste no grão e ligante.



Fonte: Klocke (2009).

Herman e Krzos (2009) desenvolveram um tipo especial de ligante vitrificado para estudar a influência da composição do ligante no desgaste radial do rebolo. Eles concluíram que a presença de uma fase cristalina fina torna possível a obtenção de uma fragmentação mais uniforme no sistema grão/ligante, fazendo com que ambos sofram desgaste sob taxas semelhantes. Além disso, a forma como ocorre esta fragmentação no ligante transforma-o em uma extensão do gume, de modo que ele atue no corte formando cavaco. Com isto obtiveram uma redução de 28% no desgaste radial do rebolo em comparação a um ligante vitrificado convencional.



### 2.3.3 Preparação dos rebolos de nitreto de boro cúbico

A preparação de um rebolo, de modo geral, envolve operações de condicionamento de sua superfície, de acordo com as características desejadas para uma determinada operação. O condicionamento é composto de limpeza e dressamento, sendo que este último é subdividido em perfilamento e afiação. A limpeza dos poros normalmente é feita durante o processo de retificação pela ação do fluxo de fluido lubrificador para retirar resíduos de ligante e abrasivo e cavacos gerados durante a usinagem. O perfilamento é uma operação que remove parte do material da superfície do rebolo, de modo que seja possível dar uma forma especial ou simplesmente se corrijam erros geométricos decorrentes do desgaste ou condições de fornecimento. No entanto o perfilamento de rebolos resinóides sem porosidade resulta em uma superfície achatada, sem grãos protuberantes ou espaços para armazenamento temporário dos cavacos, o que exige operação posterior de afiação. Na afiação, parte do material ligante e grãos achatados são removidos, de tal forma que os gumes remanescentes apresentem proeminência sobre o ligante.

Segundo König (2002), os rebolos superabrasivos (revestidos com CBN ou diamante) possuem uma dureza tão elevada que tornam o seu dressamento especialmente difícil. Eles apresentam uma tendência ao alisamento, o que exige operações posteriores de afiação.

A alta dureza dos abrasivos também tem influência sobre o desgaste das ferramentas de dressamento. As ferramentas estacionárias não são recomendadas, pois apresentam poucos diamantes, os quais rapidamente se desgastarão quando em contato com o rebolo. Nestas aplicações normalmente se empregam ferramentas rotativas, das quais as mais utilizadas são:

- a) Rolo diamantado de perfilamento;
- b) Rolo diamantado de forma;
- c) Rebolo diamantado tipo copo.

O rolo diamantado de forma é mais versátil devido à sua pequena largura e capacidade de reproduzir as mais variadas formas, desde que utilizado em máquinas com comando numérico computadorizado. Sua desvantagem é o maior tempo de dressamento relacionado com sua pequena largura (KLOCKE, 2009).

Os principais parâmetros de entrada no dressamento com rolos de forma são:

- a) Velocidade de corte;
- b) Sentido de rotação (concordante ou discordante);

- c) Velocidade de avanço;
- d) Profundidade de corte.

A relação de velocidades ( $q_d$ ) é obtida a partir da velocidade do rolo e sentido de rotação. O sentido de rotação tem influência sobre a trajetória de penetração do diamante. No dressamento concordante ( $+q_d$ ) as trajetórias são menores e a rugosidade efetiva ( $R_{t,s}$ ) é maior, favorecendo operações de desbaste. O dressamento discordante ( $-q_d$ ) deve ser escolhido quando se deseja realizar operações de acabamento.

O grau de recobrimento ( $U_d$ ) (equação 2.8) é uma variável bastante importante na determinação da topografia do rebolo e está relacionada com a largura do rolo ( $b_d$ ) e a velocidade de avanço ( $f_{ad}$ ). Valores de ( $U_d$ ) inferiores a 1 devem ser evitados, pois geram superfícies efetivas de corte muito baixas. Quanto maior o seu valor, menos agressiva será a superfície do rebolo (KLOCKE, 2009).

$$U_d = \frac{b_d}{f_{ad}} \quad (2.8)$$

Para rebolos vitrificados a operação de afiação pode ser dispensada, pois eles já apresentam porosidade decorrente do seu processo de fabricação (KÖNIG, 2002). Os rebolos superabrasivos vitrificados podem ser afiados pelo método da retificação livre, onde uma peça do mesmo material a ser retificado em processo é usinada com taxas de retificação específica ( $Z'w$ ) crescentes, até que se atinja a topografia desejada. Klocke e König (1995) apontam o processo de corte livre como mais vantajoso do que a afiação com blocos, pois a topografia resultante do rebolo, naquele caso, apresenta um número maior de picos no mesmo nível, indicando assim que houve remoção do ligante sem quebra excessiva de grãos abrasivos.

## 2.4 MEIOS LUBRIRREFRIGERANTES

Os meios lubrirrefrigerantes, também denominados fluidos de corte, são empregados em diferentes operações de usinagem com o intuito de lubrificar e refrigerar a zona de corte. As altas temperaturas atingidas nos processos de usinagem, devido às relações tribológicas que ocorrem na zona de corte, podem levar a um desgaste prematuro da ferramenta de corte e a danos na peça. A aplicação correta de fluidos lubrirrefrigerantes contribui para a manutenção da temperatura adequada na zona de corte, prolongando assim a vida da ferramenta, diminuindo

os erros dimensionais e geométricos da peça e reduzindo os danos à superfície e subsuperfície da peça.

#### **2.4.1 Meios lubrificarrefrigerantes emulsionáveis em água**

Os meios lubrificarrefrigerantes emulsionáveis em água, também tratados como fluidos de corte, têm diversas funções técnicas durante a usinagem de metais. Dentre elas podem-se citar as principais: a refrigeração da peça e máquina-ferramenta; a lubrificação da zona de corte; a limpeza da máquina por remoção dos cavacos. Apesar de suas vantagens, os fluidos de corte podem degradar-se, por vezes, pela contaminação por fungos e bactérias, que comprometem suas propriedades, resultando em danos à peça, desgaste da ferramenta de corte e riscos à saúde do operador e ao meio ambiente.

Em um processo de usinagem, o fluido de corte é depositado sobre peças e partes de máquinas, que podem entrar em contato com a pele durante a operação da máquina. Há inúmeros casos de dermatites relacionados ao contato com emulsões para corte. Quando o fluido é direcionado sobre partes girantes, ele é atomizado e permanece em suspensão no ar por determinado tempo. A névoa gerada pode ser absorvida tanto pelo contato com a pele como por inalação, sendo essa forma a que mais resulta em riscos à saúde do operador. A inalação de aerossóis aumenta muito as chances de desenvolvimento de doenças pulmonares e câncer - o limite seguro de exposição é de  $0,5 \text{ mg/m}^3$  de partículas de fluido miscível em água por massa total de partículas, em um tempo de exposição de 10 h diárias ao longo de 40 h semanais. O contato direto com o fluido pode ser evitado pelo uso de luvas, máscaras e encapsulação da máquina-ferramenta. Além disto, a formação de névoas pode ser diminuída com a redução da pressão e vazão de alimentação, por meio do melhoramento dos sistemas de aplicação destes fluidos (U. S. DEPARTMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES, 1998).

Fluidos emulsionáveis em água mais simples podem conter até sessenta substâncias diferentes, que consistem em óleos, emulsificantes, inibidores de corrosão, aditivos de extrema pressão, anti-espumantes e biocidas. O controle de suas propriedades pode prolongar sua vida, porém não evitará seu descarte. Somente na Alemanha, em 2004, foram consumidas 30000 t (toneladas métricas) de concentrado para emulsões, que após diluição de 5% em água se transformaram em cerca de 600000 t de emulsão (Rabenstein *et al*, 2009).

No Brasil não há publicações oficiais sobre a quantidade de óleo emulsionável produzido ou descartado, pois este produto é isento de registro, segundo a Resolução ANP nº 10 de 07 de Março de 2007, elaborada pela Agência Nacional de Petróleo. De acordo com a Resolução CONAMA nº 362/2005 do Conselho Nacional do Meio Ambiente, emulsões oleosas e óleos biodegradáveis não são re-refináveis e, portanto, não integram a base de cálculo da quantia de óleo lubrificante a ser coletado pelo produtor ou importador. Isto não exime os usuários da responsabilidade da destinação correta de tais produtos. No ano de 2010 foram comercializados no Brasil 221978338 litros de óleos lubrificantes acabados dispensados de coleta, sendo que neste grupo há nove diferentes classificações além dos óleos emulsionáveis (BRASIL, 2009).

#### **2.4.2 Sistemas de aplicação de fluidos lubrificarrefrigerantes**




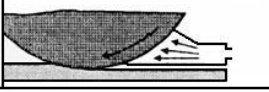
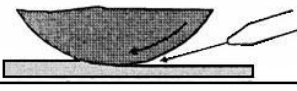
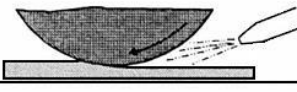
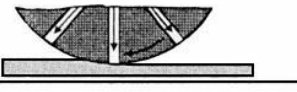
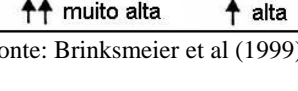
A eficiência da lubrificarrefrigeração depende não só do tipo de fluido utilizado, mas também da forma como ele é aplicado. Inúmeras pesquisas têm sido realizadas a fim de desenvolver sistemas capazes de melhorar o processo de retificação, tanto do ponto de vista tecnológico quanto econômico e ecológico. A figura 10 mostra alguns exemplos de sistemas de aplicação. O principal desafio é vencer a barreira aerodinâmica formada sobre a superfície do rebolo, que afasta o fluxo de fluido lubrificarrefrigerante da zona de corte.

O sistema mais utilizado é o de jato livre, por sua simplicidade e flexibilidade. Nele o fluido deve ser aplicado com velocidade igual ou superior à velocidade periférica do rebolo para vencer o colchão de ar formado sobre a superfície do mesmo. Em processos de retificação de baixa velocidade o efeito do colchão de ar é pouco relevante, porém, quando se aplicam altas velocidades de corte, as grandes vazões de fluido e pressões de bombeamento acarretam em alto custo e risco. Para reduzir os efeitos da barreira aerodinâmica, soluções como raspadores ou jatos adicionais de fluido já foram utilizadas, porém questiona-se sua eficiência. Os raspadores necessitam de constante ajuste de posição, enquanto que o jato adicional demanda maior volume de fluido e potência de acionamento que não são utilizados para refrigeração (BRINKSMEIER *et al*, 1999).

Uma combinação dos dois sistemas acima citados é obtida com a tubeira tipo sapata, que atua como raspador e aplica o fluido diretamente na zona de corte. A câmara formada pelos canais da tubeira é posicionada a décimos de milímetro da superfície do rebolo, impedindo a forma-

ção do colchão de ar, ao mesmo tempo em que a textura do rebolo conduz o fluido à zona de corte, por efeito de arraste (VITS, LEE e POWEL *apud* BRINKSMEIER *et al*, 1999).

Figura 10 – Exemplos de estratégias de alimentação de fluido de corte.

tuberas de inundação		tuberas convencionais	
		a: mangueira segmentada	
		b: tubo	$Q_{CL} \uparrow \uparrow$
		c: tubeira jato livre	
		tubeira sapata	$Q_{CL} \uparrow$
		tubeira de jato local	$Q_{CL} \uparrow$ $Q_{CL} \downarrow$
		tubeira "spray"	$Q_{CL} \downarrow \downarrow$
		alimentação interna	$Q_{CL} \uparrow$ $Q_{CL} \downarrow$
		$\uparrow \uparrow$ muito alta	$\uparrow$ alta $\downarrow$ baixa $\downarrow \downarrow$ muito baixa

Fonte: Brinksmeier et al (1999).

Um dos efeitos benéficos do uso da tubeira tipo sapata é apresentado na figura 11, onde se compara à refrigeração com tubeira de jato livre, empregando emulsão. Observa-se que, mesmo utilizando uma vazão de fluido menor, não há ocorrência de faiscamento com o uso da sapata. A redução de calor gerado no processo reduz as possibilidades de desgaste químico do CBN (KÖNIG, 2002). Weingärtner (2005) obteve um aumento na relação de remoção (G) de 920%, mesmo com uma redução na vazão em 37%, comparado ao uso com tubeira de jato livre. Isto significa que, para uma taxa de retificação específica ( $Z'w$ ) de  $10\text{mm}^3/(\text{mm.s})$ , foi retificado um volume específico ( $V'w$ ) de  $60800\text{mm}^3/\text{mm}$  e obtido um desgaste radial do rebolo ( $\Delta r_s$ ) igual a  $8\mu\text{m}$ .

Figura 11 – Alimentação de fluido de corte: jato livre (esq.) e tubeira sapata (dir.).



Fonte: Weingärtner (2005).

Na retificação com rebolos de CBN, porém, a tubeira tipo sapata é utilizada para aplicação de óleo integral, que apresenta o inconveniente de ser mais viscoso do que as emulsões. De acordo com Gviniashvili *et al* (2004), uma parcela da potência do eixo-árvore é necessária para acelerar o fluido, quando este entra em contato com o rebolo. Nesse processo, o aumento da viscosidade resulta em perdas por atrito entre o fluido e a peça. Segundo Klocke *et al* (2000) e Brinksmeier *et al* (1999), o óleo integral é mais vantajoso do que as emulsões, em virtude dos resultados obtidos de rugosidade e desgaste radial do rebolo. Tawakoli *et al* (2007) obtiveram uma relação de remoção  $G$  de 12000 para óleo integral contra 3000 para emulsão (75% pior), retificando aço 100Cr6 com rebolo de CBN. Além do aumento de potência, a tubeira sapata é apontada como desvantajosa por exigir um número grande de reajustes de sua posição em relação ao rebolo.

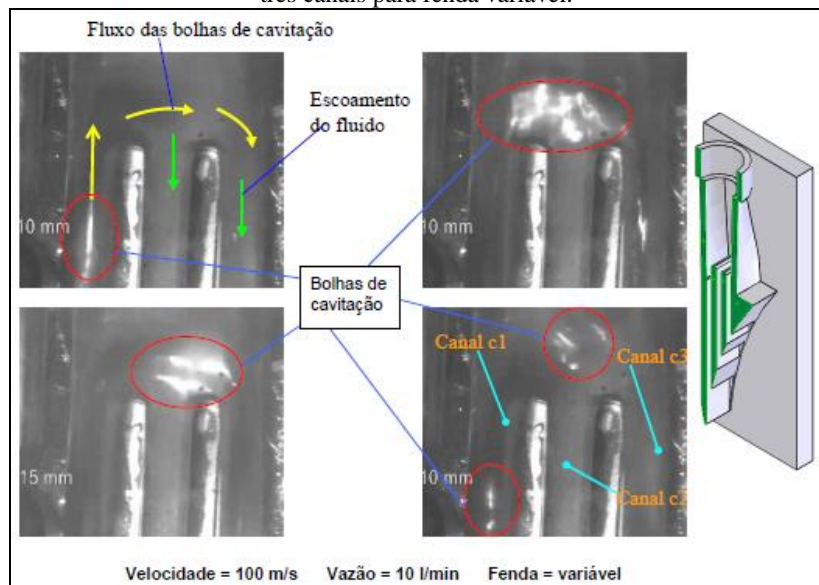
## 2.5 COMPORTAMENTO DO FLUIDO NO INTERIOR DA TUBEIRA TIPO SAPATA

O principal objetivo da tubeira tipo sapata é garantir que o fluido fornecido chegue à zona de corte, sem presença de ar. Ao mesmo tempo em que a tubeira deve impedir a formação do colchão de ar e garantir o contato do fluido de corte com o rebolo, também deve direcionar o fluxo de fluido no interior da sapata de forma laminar, para que não ocorram turbulência e bolhas de cavitação.

A eficiência da tubeira na refrigeração da zona de corte pode ser consideravelmente melhorada com o aprimoramento de sua geometria. Lopes (2007) desenvolveu quatro tipos de geometria interna da tubeira, as quais interferem no comportamento do fluxo do fluido lubrificador-refrigerante. Os melhores resultados foram obtidos com uma tubeira de três canais retos, em que se verificou menor ocorrência de turbulência e cavitação.

Segundo Lopes (2007), os principais parâmetros de influência sobre o fluxo no interior da tubeira são a velocidade periférica e a textura do rebolo, a fenda entre tubeira e rebolo e a vazão de fluido. Na entrada e na saída dos canais ocorre forte turbulência com flutuações de pressão que podem levar à formação de bolhas de cavitação. Se a velocidade periférica do rebolo for superior à velocidade de escoamento do fluido, acima de um determinado valor, ocorre uma queda de pressão capaz de levar o fluido a vaporizar. A figura 12 mostra as regiões onde podem ocorrer bolhas de cavitação.

Figura 12 – Escoamento de fluido na região de entrada da tubeira B reta com três canais para fenda variável.



Fonte: Lopes (2007).

A fenda de trabalho exerce influência sobre o escoamento do fluido e o impedimento da formação do colchão de ar. Para valores muito pequenos da fenda, a vazão torna-se baixa e ocorre cavitação, enquanto que para aberturas demasiadas ocorre o arraste de ar para o interior da câmara da tubeira. Os valores mínimos e máximos da fenda dependem da geometria interna da tubeira e podem ser vistos no quadro 1, enquanto que o comportamento do fluido com fendas excessivas pode ser visto na figura 13. A determinação da fenda deve ser feita em conjunto com a vazão, pois a variação destes ocasiona variação da pressão no interior da tubeira e da velocidade de saída do fluido, que se reflete sobre o processo (LOPES, 2007). A velocidade do fluido ( $v_f$ ) na interface com o rebo- lo depende da velocidade de corte ( $v_s$ ) (velocidade periférica do rebo- lo) e pode ser calculada pela equação 2.9, em que ( $Q_f$ ) e ( $A_s$ ) representam a vazão e a área da fenda respectivamente.

$$v_f \left[ \frac{m}{s} \right] = v_s \cdot \left( \frac{Q_f}{A_s} \cdot \frac{\left[ \frac{m^3}{min} \right] \cdot \left( \frac{60s}{1min} \right) \cdot \left( \frac{1000}{mm^2} \right)} \right) \quad (2.9)$$

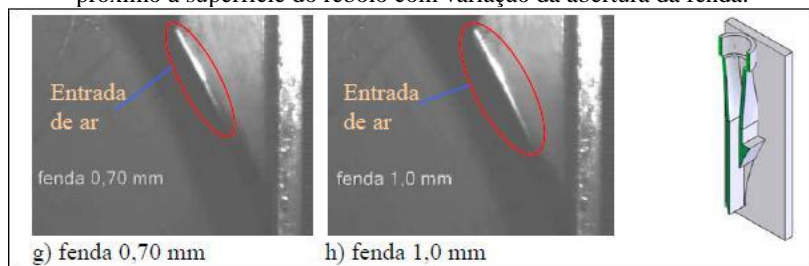
Quadro 1 – Comportamento do fluido no interior das tubeiras tipo sapata com variação da fenda.

Fenômeno	Tubeira A de canal simples	Tubeira B reta com três canais			Tubeira C côncava com três canais			Tubeira D convexa com três canais		
		Canal c1	Canal c2	Canal c3	Canal c1	Canal c2	Canal c3	Canal c1	Canal c2	Canal c3
Turbulência e vaporização no interior da tubeira	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
	0,15 mm	0,40 mm	0,40 mm	0,15 mm	2,0 mm	2,0 mm	2,0 mm	0,30 mm	0,20 mm	0,20 mm
Entrada de ar na fenda entre rebo- lo e tubeira	acima de	acima de	acima de	acima de	acima de	não até	acima de	acima de	acima de	acima de
	0,30 mm	1,0 mm	1,5 mm	1,5 mm	1,5 mm	2,0 mm	1,5 mm	0,7 mm	1,0 mm	1,0 mm
velocidade periférica do rebo- lo: 100m/s - vazão: 10l/min										

Fonte: Lopes (2007).



Figura 13 – Escoamento de fluido para a tubeira A reta de canal simples próximo à superfície do rebolo com variação da abertura da fenda.



Fonte: Lopes (2007).

Os fluidos lubrificador-refrigerantes apresentam duas funções principais: lubrificar a zona de corte para reduzir atrito entre peça e rebolo; refrigerar a peça e o rebolo para reduzir os danos térmicos. Quando se trata da ação lubrificante do fluido, apenas a porção que está presente na zona de corte desempenha sua função. Portanto, o fluxo excedente não terá efeito algum sobre a redução de atrito. Por meio do cálculo do volume de poros da superfície do rebolo é possível determinar o volume de fluido que pode ser transportado efetivamente à zona de corte e, de acordo com a velocidade periférica do rebolo, determina-se a vazão necessária.

Klocke *et al* (2000) estudaram o máximo fluxo de fluido através da zona de corte e sua influência sobre as forças induzidas na retificação de alta velocidade com rebolos de CBN. Obtiveram valores de vazão específica ( $Q'_n$ ) entre 0,45 e 0,55 l/(min.mm), para um rebolo com ligante vitrificado de granulometria 150 $\mu$ m (B151) e velocidade ( $v_s$ ) de 100m/s. Também constatou-se que o aumento da vazão específica além da capacidade de transporte do rebolo, elevou a força normal de corte. Lopes (2007) alcançou bons resultados de escoamento com vazões específicas ( $Q'_n$ ) entre 0,36 e 0,54 l/(min.mm) e velocidade periférica do rebolo de 100m/s.

## 2.6 FERRO FUNDIDO NODULAR

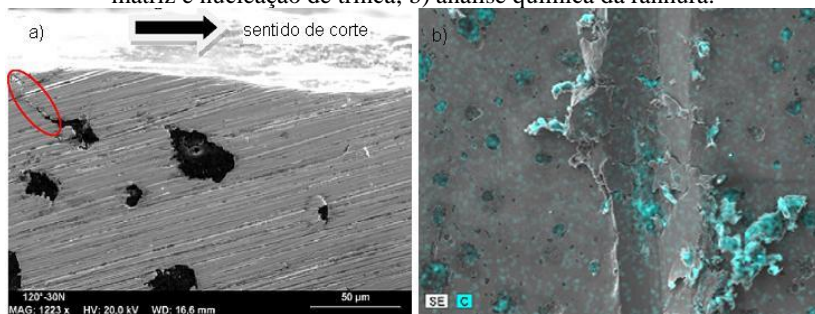
Os ferros fundidos nodulares apresentam grafita em formato nodular, o que altera sua característica de fratura. Enquanto que nos ferros fundidos cinzentos a fratura é exclusivamente frágil, nos ferros nodulares ela pode ocorrer de forma dúctil. Somando a isso a escolha do tipo de matriz e elementos de liga, propriedades mecânicas, como o limite de ruptura, são melhoradas Chiaverini (1988).

## 2.6.1 Usinabilidade dos ferros fundidos nodulares

Os ferros fundidos nodulares apresentam uma forma característica para quebra de cavaco, que faz com que ela não ocorra tão facilmente quanto nos ferros cinzentos. Assim, os cavacos tendem a ser mais longos e, portanto, permanecem mais tempo em contato com a ferramenta de corte (GUESSER, 2009). Tal característica não é desejada, pois eleva o atrito na interface entre cavaco e gume e a transferência de calor para o mesmo, acelerando o desgaste da ferramenta. Em contrapartida, durante a formação do cavaco ocorre a deformação plástica da matriz e a grafita presente nos nódulos é expulsa dos mesmos, atuando como lubrificante. Tkaya *et al* (2009), em ensaios de riscamento, puderam confirmar tal fenômeno, conforme figura 14a. Na figura 14b, a presença de grafita na ranhura criada pelo penetrador é confirmada pelos pontos de coloração azulada.

A ação lubrificante da grafita foi confirmada por Brinksmeier *et al* (2006), que investigaram o uso de grafite como lubrificante seco. Com o uso de grafite obteve-se melhor resultado de desgaste radial do rebolo, comparado à inundação de emulsão, à mínima quantidade de lubrificante (com éster) e retificação a seco.

Figura 14 – Ensaio de riscamento com ferro fundido nodular. a) deformação da matriz e nucleação de trinca; b) análise química da ranhura.



Fonte: Tkaya *et al* (2009).

As principais variáveis de influência sobre a usinabilidade são a matriz predominante e os elementos de liga. O aumento do teor de carbono ou a presença de elementos de liga que conduzam ao aumento da dureza, geralmente pioram a usinabilidade. Apesar disso, os ferros nodulares apresentam boa usinabilidade quando comparados à maioria dos aços.

## 2.7 QUALIDADE DA SUPERFÍCIE USINADA

A qualidade da superfície usinada é avaliada, entre diferentes características, pela sua textura e depende do processo de fabricação. A textura da superfície, por sua vez, deve ter características compatíveis com a função que a superfície técnica desempenhará e com os tipos de solicitações a que estará sujeita. O critério mais utilizado para avaliação é o da rugosidade da superfície retificada, representada por diferentes parâmetros, de acordo com as características que se deseja descrever. Superfícies usinadas por diferentes processos apresentam perfis de rugosidade distintos e, às vezes, o parâmetro de rugosidade que descreve bem uma superfície não o faz em outra. Porém quando se deseja comparar superfícies produzidas pelo mesmo processo, podem ser usados parâmetros mais simples, como  $R_a$  e  $R_z$ , os quais permitem uma avaliação do comportamento do processo (BET, 1999).

Superfícies usinadas por retificação apresentam sulcos distribuídos irregularmente na direção de corte (perfil não periódico), decorrente da natureza aleatória da distribuição de gumes no rebolo. Os cavacos produzidos possuem espessura de poucos micrometros, por isso a rugosidade resultante é baixa em relação a outros processos de usinagem, como torneamento e fresamento. A Norma DIN 4766 apresenta os valores de rugosidade esperados para peças usinadas por retificação. Brinksmeier *et al* (1998) estabelecem valores de rugosidade  $R_a \leq 0,5 \mu\text{m}$  e  $R_z \leq 6,3 \mu\text{m}$  como parâmetros-alvo para modelagem e melhoria do processo.

Como a rugosidade é derivada do processo de fabricação, a variação do perfil daquela se dará em razão do comportamento deste, mais especificamente do modo como o rebolo se desgasta. Inicialmente o rebolo apresenta gumes mais afiados e topografia menos regular devido ao dressamento, porém à medida que se aumenta o volume usinado os grãos mais protuberantes são quebrados ou desgastados e a topografia do rebolo fica mais nivelada, desde que o mecanismo de desgaste dominante seja o de microdesgaste. Isto leva a uma diminuição da rugosidade da peça. Se houver aumento das forças de corte, estes grãos poderão ser quebrados novamente tornando-se afiados, resultando em aumento da rugosidade. Quando o mecanismo dominante for o de macrodesgaste, a rugosidade aumentará ao longo do tempo de retificação (KÖNIG, 2002).

Muitos modelos matemáticos de predição da rugosidade são baseados na variação da topografia do rebolo ao longo do tempo, ou seja, em função do volume específico usinado (TÖNSHOFF *et al* 1992).

Hecker e Liang (2003) propõem um modelo probabilístico de predição da rugosidade ( $R_a$ ) por meio do cálculo da espessura do cavaco não deformado, baseado na densidade de gumes estáticos e dinâmicos. Em sua metodologia são considerados dois principais fenômenos de formação do cavaco: sulcamento e corte. Em ambos os casos, a profundidade da ranhura criada pela trajetória do grão pode ser considerada igual à espessura do cavaco não deformado.

Fujimoto *et al* (2006), estudando a topografia de rebolos de CBN, verificou que após o dressamento há uma fase de instabilidade enquanto os gumes são nivelados pelo desgaste. Em seguida, com o predomínio do desgaste por abrasão, mantém-se uma fase estável, até que as forças sobre o grão modifiquem seu mecanismo de desgaste para microfratura e fratura. Assim, a densidade de gumes diminui e a rugosidade aumenta.



### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais e métodos de retificação utilizados nesta pesquisa foram os mesmos utilizados por Weingärtner (2005) em sua dissertação de mestrado, com exceção da tubeira para direcionamento do fluido lubrificador. Esta tubeira necessitava de aprimoramentos que foram realizados posteriormente por Lopes (2007) em sua tese de doutorado. Estes aprimoramentos visavam à melhoria do fluxo de fluido para garantir a lubrificação mais eficiente da zona de corte com a menor vazão possível. Lopes apresentou a geometria interna da tubeira e os parâmetros de vazão de fluido e fenda de trabalho que geravam os melhores resultados.

#### 3.1 TIPO DE PROCESSO DE RETIFICAÇÃO

Os ensaios foram realizados pelo processo de retificação cilíndrica externa de mergulho, classificado pela Norma DIN 8589-11, com a peça sendo fixada entre centros. Neste processo o desgaste da superfície do rebolo ocorre por igual em toda a largura de contato. Para evitar o desgaste de quina e vencer as limitações de potência de acionamento da máquina-ferramenta, foram utilizados apenas 6 mm da largura do rebolo.

#### 3.2 MÁQUINA-FERRAMENTA

A máquina-ferramenta utilizada foi uma retificadora cilíndrica externa e interna por comando numérico computadorizado (CNC), da marca ZEMA Zselics Ltda., modelo Pratika Flexa-600-L (figura 15), pertencente ao Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP) do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC. Esta máquina é equipada com comando Siemens 840D, possui potência de acionamento de 5,6 kW e atinge 100 m/s de velocidade periférica do rebolo para um diâmetro máximo de 406 mm. Permite a retificação de peças com até 275 mm de diâmetro e 600 mm de comprimento, por meio do deslocamento em dois eixos de direção X e Z (transversal e longitudinal respectivamente), sendo que possui fusos de esferas recirculantes de grande precisão para acionamento dos eixos.

Figura 15 – Retificadora CNC cilíndrica da marca ZEMA.



### 3.3 FERRAMENTA DE CORTE

Para a realização dos ensaios foi utilizado um rebolo de nitreto de boro cúbico (CBN) com ligante vitrificado, de acordo com as especificações na tabela 1.

**Tabela 1- Características do rebolo de CBN com ligante vitrificado.**

<b>Especificação completa do rebolo</b>	<b>14A1 V B151 C150 CB7 18B12 ST</b>
Perfil do rebolo	Reto (14A1)
Tipo de ligante	Vitrificado (V) – 18B12
Granulometria (tamanho do grão)	151 $\mu\text{m}$ (B151)
Concentração volumétrica de CBN	C150
Tipo de grão	CBN (CB7)
Corpo do rebolo	Aço (ST – do alemão “stahl”)
Diâmetro	400 mm
Largura	30 mm
Espessura do revestimento	5 mm
Diâmetro do furo de fixação	127 mm

FONTE: Weingärtner, 2005.

Antes de ser fixado na máquina, o rebolo foi balanceado estaticamente em um cavalete de balanceamento. Para isso o rebolo foi mon-

tado em um mandril, o qual rolou sobre duas guias paralelas e cilíndricas do cavalete. No flange do rebolo existem massas que podem ser deslocadas para que o centro de massa coincida com o centro geométrico. Estando balanceado estaticamente, o rebolo foi balanceado dinamicamente na própria retificadora, por meio de um sistema hidrocompensador, que injeta líquido em quatro câmaras distribuídas em torno do eixo-árvore.

Após o balanceamento, o rebolo foi dressado com grau de recobrimento  $U_d = 8$ , sem operação posterior de afiação. De acordo com Klocke e König (1995), a topografia do rebolo torna-se mais adequada com condicionamento pelo método do corte livre. Logo após o dressamento o comprimento do perfil de rolamento ( $t_{p,20}$ ) e o número de gumes estáticos ( $S_{stat,20}$ ) caem rapidamente e se estabilizam com  $1000\text{mm}^3/\text{mm}$  de volume específico ( $V'_w$ ) usinados. Como em cada ensaio foram usinadas trinta e quatro regiões de  $2000\text{mm}^3/\text{mm}$  cada, após a usinagem da primeira região já foi possível condicionar o rebolo.

### 3.4 FERRAMENTA DE DRESSAMENTO

Foi utilizado como ferramenta de dressamento um disco diamantado, fabricado pela empresa Dr. Kaiser, montado em um cabeçote de acionamento, conforme tabela 2. Este disco tem corpo de aço e revestimento de diamante com ligante sinterizado, que proporciona uma característica de autoafiação à medida que o gume se desgasta.

**Tabela 2- Características do disco diamantado de dressamento.**

<b>Especificação do disco: R140 IN2515 110 0,8 6 40 10 TK D251 C150</b>	
Tipo de grão	Diamante
Perfil do rolo dressador	Reto (formato RI)
Diâmetro	110 mm
Largura de contato	0,8 mm
Espessura do revestimento	6 mm
Diâmetro do furo de fixação	40 mm
Tamanho do grão	251 $\mu\text{m}$
Tipo de ligante	Sinterizado
Corpo do disco	Aço
Concentração volumétrica	C150

FONTE: Weingärtner, 2005.



Os parâmetros de dressamento foram selecionados de acordo com recomendações do fabricante, que equiparam-se aos citados por Klocke (2009), pra rebolos superabrasivos e disco de dressamento de diamante. Quando se deseja uma condição mais agressiva do rebolo, recomenda-se fazer dressamento concordante, com relação de velocidades ( $q_d$ ) de 0,8. Porém, com grau de recobrimento ( $U_d$ ) de 8 obtém-se menor desgaste radial do rebolo. Os parâmetros empregados seguem abaixo:

- Relação de velocidades concordante  $q_d = 0,8$ ;
- Grau de recobrimento  $U_d = 8$ ;
- Profundidade de penetração  $a_{ed} = 4 \times 5 \mu\text{m}$ ;
- Velocidade de corte do rebolo  $v_{sd} = 60 \text{ m/s}$ .

### 3.5 MATERIAL ENSAIADO

O material ensaiado foi o ferro fundido nodular perlítico, classificação GGG70, de acordo com a norma DIN 1693, fornecido em cilindros pela indústria de fundição Tupy. Este material possui especificações similares nas normas:

- ABNT NBR 6916 – classe FE70002;
- ASTM A-536 – classe 100-70-03;
- SAE J 434 c – classe D-7003.

De acordo com o fabricante (TUPY, 2008), a microestrutura deste material é constituída de grafita nodular formas I e II, tamanhos 5 a 8 e sua matriz é predominantemente perlítica, podendo apresentar aproximadamente 30% de ferrita.

Para ferros fundidos nodulares de aplicações automotivas, a Norma ABNT NBR 8650/1984 especifica a composição química, em adição à Norma ABNT NBR 6916/1981 (GUESSER, 2009), conforme a tabela 3.

**Tabela 3- Composição química para o ferro fundido nodular ABNT NBR 8650/1984 - FE 70002**

<i>Elemento</i>	<i>Quantidade (%)</i>
C	3,4 – 3,8
Si	2,3 – 2,8
Mn max.	1,00
P max.	0,09
S max.	0,02
Cu	0,50 – 1,00
Mg	0,04 – 0,06

FONTE: Guesser, 2009.

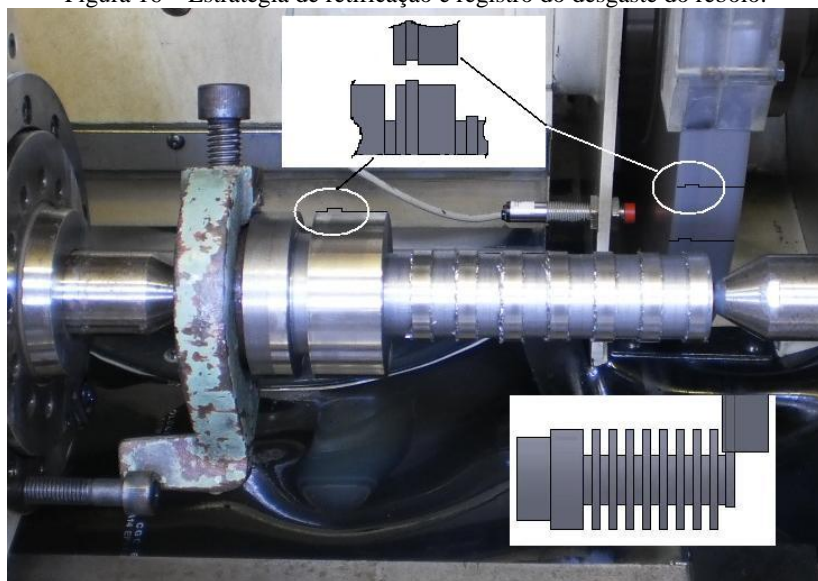
### 3.5.1 Corpos de prova

Os corpos de prova foram usinados com dimensões máximas próximas às do material bruto. A geometria do corpo de prova foi projetada de modo a permitir retificar o maior volume possível, para aproveitar ao máximo o material, assim como vencer as limitações geométricas da máquina. Para evitar o desgaste de quina e vencer a limitação de potência de acionamento do eixo-árvore, foram usinados canais no corpo de prova, de tal maneira que, a cada mergulho, fossem utilizados apenas 6 mm de largura do rebolo, afastados 4 mm da quina esquerda do rebolo. Como a placa lateral da tubeira possui 5 mm de espessura, o canal foi usinado com 10 mm de largura. As dimensões dos corpos de prova são apresentadas no Apêndice A.

Weingärtner (2005), em ensaios com rebolo vitrificado de CBN e aplicação de fluido lubrificador com tubeira tipo sapata, obteve desgaste radial do rebolo de 6  $\mu\text{m}$ . Para chegar a este resultado foi necessário retificar um volume específico  $V'_w = 60800 \text{ mm}^3/\text{mm}$ , o que equivale a quatro corpos de prova aproximadamente. Adequando os requisitos dos ensaios aos resultados obtidos por Weingärtner e ao aproveitamento do material, foi retificado em cada ensaio um volume específico  $V'_w = 68135 \text{ mm}^3/\text{mm}$ , ou um volume total  $V_w = 408810 \text{ mm}^3$ .

Cada ensaio foi realizado com quatro corpos de prova, sendo que o último possuía uma região para registro do desgaste radial do rebolo. Nesta região foi utilizada a largura integral do rebolo, numa retificação de mergulho, removendo 0,2 mm do diâmetro da peça. Assim, o desgaste causado na região utilizada do rebolo foi reproduzido na peça e as regiões adjacentes (intactas) serviram como referência. A figura 16 apresenta a metodologia de ensaio. No item 3.8.1 serão apresentados detalhes sobre a medição do desgaste.

Figura 16 – Estratégia de retificação e registro do desgaste do rebolo.



### 3.6 FLUIDO LUBRIRREFRIGERANTE

Como fluido lubrificador foi utilizado óleo emulsionável em água Quaker 530-R - do fabricante Quaker Chemical do Brasil - numa concentração de 5% de óleo em água. Este óleo é composto de: óleo mineral, sabões de petróleo, amidas e bactericidas.

Para manter a concentração sempre correta, a cada ensaio era feito o controle com uso de um refratômetro e, quando necessário, adicionava-se água ou óleo para o devido ajuste. No decorrer dos ensaios ocorreram perdas de fluido nos processos de limpeza da máquina-ferramenta e de filtragem, assim como por evaporação natural da água. Estas perdas foram compensadas com restabelecimento do nível no reservatório. Em momento algum houve substituição total do fluido, o que acarretou em contaminação progressiva do mesmo.

#### 3.6.1 Sistema de alimentação e filtragem

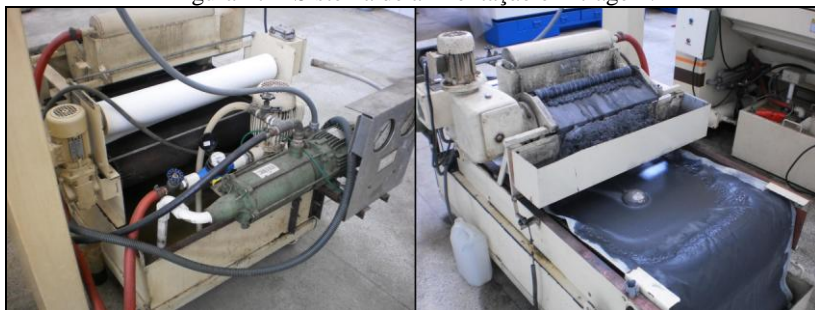
A unidade de tratamento do fluido é composta por:

- a) Reservatório de fluido com capacidade de 250 l;

- b) Bomba para injeção de fluido;
- c) Separador magnético de cavacos;
- d) Filtro composto de manta de tecido;
- e) Regulador de vazão de fluido com indicador na saída da bomba;
- f) Indicador de pressão ligado à saída da bomba;
- g) Bomba de retorno do fluido.

Na figura 17 é mostrado o sistema de alimentação e filtragem.

Figura 17 – Sistema de alimentação e filtragem.

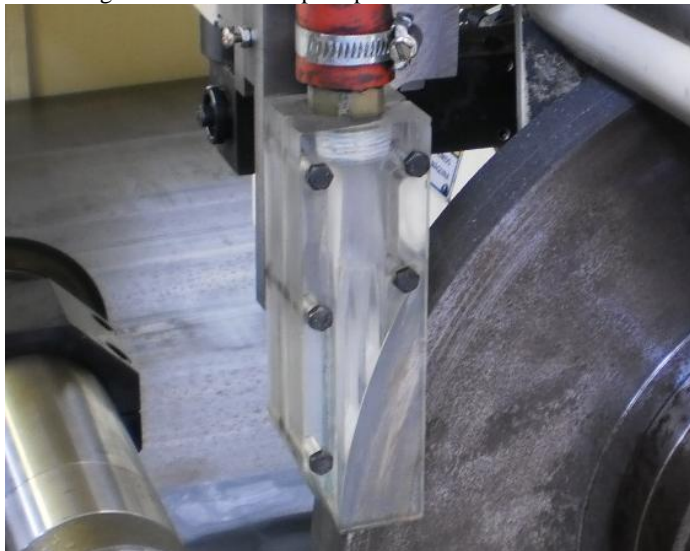


Embora houvesse duas etapas de filtragem – uma de separação de partículas magnéticas e outra de filtragem por manta – não foi possível evitar a contaminação por grafita.

### 3.6.2 Tubeira tipo sapata

A tubeira tipo sapata (figura 18) foi fabricada em acrílico transparente, por usinagem, em um centro de usinagem por comando numérico computadorizado. Sua geometria interna foi reproduzida de acordo com o projeto de Lopes (2007), para uma tubeira de três canais retos. Segundo o autor, a área interna na saída dos canais deve ser igual à área interna da entrada da tubeira, para que não ocorra variação da velocidade de escoamento. Esta variação pode resultar em turbulência ou geração de bolhas de cavitação, prejudiciais ao fluxo laminar desejado.

Figura 18 – Tubeira tipo sapata com três canais retos.



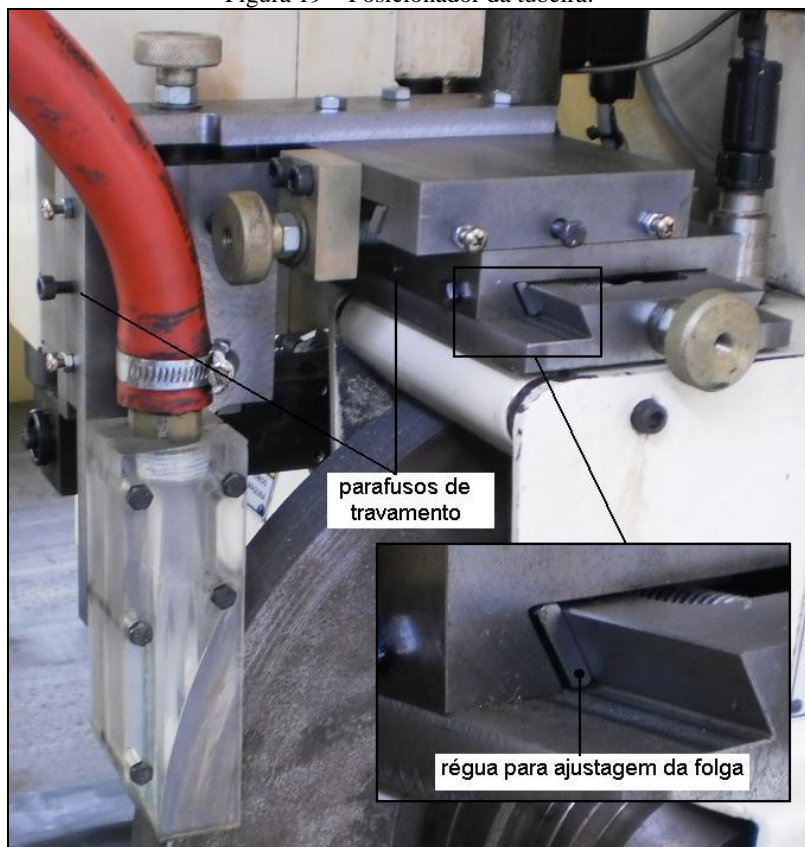
A face que contém os canais de saída do fluido deve apresentar a mesma curvatura do rebolo, assim ela foi pré-usinada com o raio nominal do mesmo. Após a montagem no posicionador, a tubeira foi posicionada contra o rebolo em movimento, até que sua face de saída fosse completamente usinada, ficando com a mesma curvatura do rebolo.

Com o rebolo parado, ajustava-se a fenda de trabalho, com auxílio de um jogo de calibre de folga.

### 3.6.3 Sistema de posicionamento da tubeira

Uma das principais limitações das tubeiras tipo sapata está relacionada com a pequena faixa de ajuste da fenda de trabalho. Valores muito baixos de fenda podem gerar bolhas de cavitação e turbulência no interior da câmara, enquanto que valores acima do limite permitem a entrada de ar, reduzindo a eficiência de lubrificação do fluido (LOPES, 2007). Para garantir o posicionamento correto da tubeira e sua rigidez durante o trabalho, foi construído um posicionador manual de três eixos cartesianos (x, y e z), com guias lineares translativas do tipo rabo de andorinha, réguas para ajustagem da folga durante o posicionamento e parafusos de travamento. A figura 19 mostra uma vista do posicionador montado sobre a proteção do rebolo.

Figura 19 – Posicionador da tubeira.



### 3.7 VERIFICAÇÃO DAS GRANDEZAS DE ENTRADA

A verificação das grandezas de entrada se faz importante devido à possibilidade de alteração de comportamento dos movimentos da máquina-ferramenta e dos instrumentos de medição, acoplados ao sistema de lubrificação. Segundo Albertazzi e Sousa (2008), a verificação pode substituir a calibração, pois é uma operação correlata a essa, realizada para verificar o desempenho de um sistema, de forma simples e eficaz.

As grandezas de entrada de interesse, originárias do sistema composto por máquina-ferramenta e equipamento de lubrificação, se-

ção detalhadas a seguir, assim como o modo de verificação. As grandezas relativas à máquina-ferramenta quantificam os movimentos das partes envolvidas (velocidades de avanço e rotação), enquanto que no equipamento de lubrificarrefrigeração, o escoamento do fluido.

### 3.7.1 Grandezas relacionadas à máquina-ferramenta

As grandezas de entrada relativas à máquina-ferramenta foram verificadas anteriormente por Weingärtner (2005) e toda a metodologia foi descrita em sua dissertação de mestrado. Como os ensaios foram realizados na mesma máquina, sob os mesmos parâmetros de corte e não houve modificações ou avarias no equipamento, a verificação não foi refeita. As grandezas e seus resultados são apresentados na tabela 4, sendo que em cada caso foram realizadas medições em diferentes faixas. São indicados aqui apenas os erros máximos.

**Tabela 4 - Erro máximo das grandezas de entrada**

<b>Grandezas de entrada</b>	<b>Erro (%)</b>
Velocidade de rotação do rebolo	0,7
Velocidade de rotação do cabeçote porta-peças	0,6
Velocidade de avanço do cabeçote porta-rebolo	1,9
Velocidade de rotação do disco de dressamento	0,6

FONTE: Weingärtner, 2005.

Para todas as grandezas avaliadas, o erro foi considerado desprezível, inclusive na grandeza velocidade de avanço do cabeçote porta-rebolo. Esta foi avaliada com auxílio de cronômetro manual e por isso está sujeita a erros do operador. Para tempos de medição mais altos o erro diminui.

### 3.7.2 Vazão do fluido lubrificarrefrigerante

Utilizou-se para o controle da vazão de fluido lubrificarrefrigerante o mesmo hidrômetro utilizado por Lopes (2007), fabricado pela FAE Tecnologia, modelo DELTA MTF IX, instalado na saída da bomba de alimentação (ver figura 20). O hidrômetro foi verificado por Lopes, durante a realização dos experimentos para sua tese de doutorado. Ele utilizou o método de pesagem do fluido coletado durante vinte segundos. O erro máximo obtido foi de (1%) um por cento.

Figura 20 – Sistema de medição de vazão de fluido de corte.



Em cada ensaio a vazão foi regulada com uma válvula do tipo gaveta, montada em série com o hidrômetro. Com auxílio de um cronômetro mede-se o tempo necessário para escoar um determinado volume para, assim, calcular-se a vazão (BERTALAN 1997).

### 3.7.3 Rigidez do sistema de posicionamento da tubeira

A verificação da rigidez foi feita com auxílio de um relógio comparador, com resolução de 0,01 mm e faixa de medição de 10,00 mm. O objetivo era o de verificar a oscilação da tubeira, na direção de posicionamento, após o acionamento da bomba de injeção de fluido lubrificadorrefrigerante. Foi constatado que, para vazões próximas às utilizadas nos ensaios, não ocorria oscilação do ponteiro do relógio comparador. Apenas para vazões superiores a 40 l/min o ponteiro oscilava dentro de uma faixa correspondente a 0,05 mm.

## 3.8 GRANDEZAS PARA AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DE TRABALHO

O principal objetivo desta pesquisa é avaliar o desgaste de um reboło, portanto foi uma das grandezas avaliadas. Para entendimento de determinados mecanismos de desgaste também foi avaliada a rugosida-



de das peças retificadas. Nos itens 3.8.1 e 3.8.2 são apresentadas as metodologias para avaliação das grandezas.

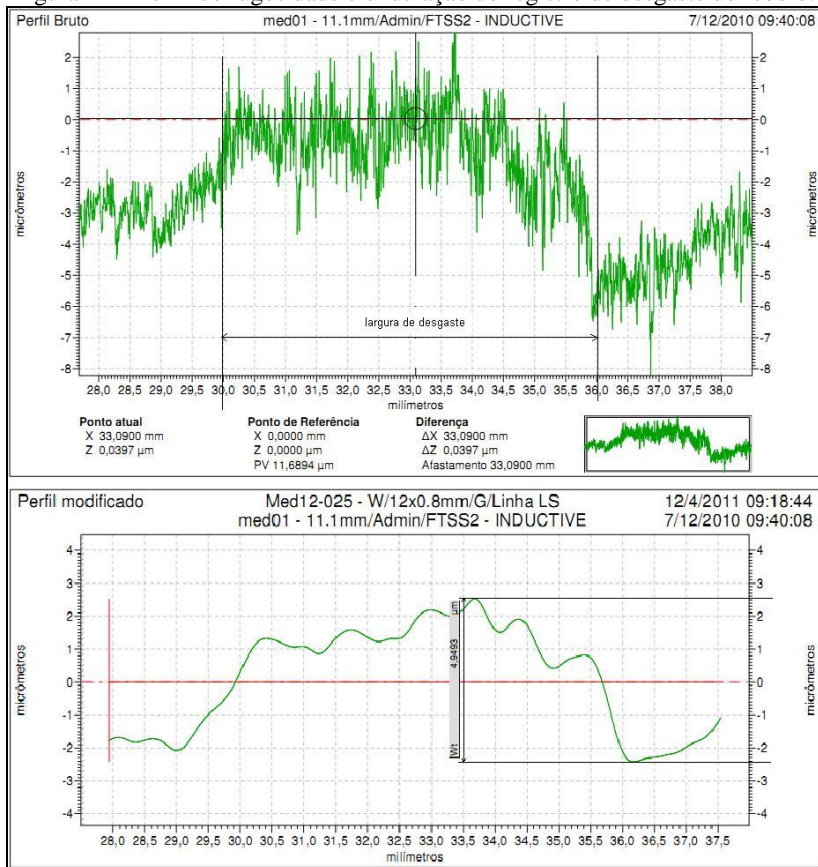
### **3.8.1 Desgaste radial do rebolo**

O desgaste radial do rebolo foi medido de modo indireto, pela avaliação do perfil bruto de rugosidade de uma superfície retificada por ele após a usinagem de um volume específico ( $V'_w$ ) igual a  $68135 \text{ mm}^3/(\text{mm.s})$ . Este método tem a vantagem de apresentar graficamente o perfil avaliado. As medições foram realizadas na Fundação CERTI, com um rugosímetro Taylor Hobson, modelo Form Taly Surf Series 50, equipado com um apalpador indutivo com raio de  $2\mu\text{m}$  e ponta esférica. O comprimento de amostragem adotado foi de 11mm, com cut off de 0,8mm, de modo que o apalpador percorresse a região desgastada e as regiões de referência. A figura 21 mostra um exemplo do resultado da avaliação do perfil de desgaste.

O rugosímetro Taylor Hobson é equipado com um software capaz de gerar o gráfico do perfil bruto e os gráficos filtrados dos perfis de ondulação e desgaste. Com o gráfico do perfil de ondulação pode ser obtida a altura do desgaste radial do rebolo, que é igual ao parâmetro  $W_t$  (ondulação máxima). Os gráficos dos perfis brutos e filtrados de todos os ensaios são apresentados no Apêndice B.

Com o conhecimento do desgaste radial e do diâmetro do rebolo se faz o cálculo da relação de remoção  $G$ , dada pela razão entre o volume usinado e o volume desgastado do rebolo.

Figura 21 – Perfil de rugosidade e ondulação do registro de desgaste do rebolo.



### 3.8.2 Rugosidade da peça

Para se conhecer a progressão da rugosidade das superfícies retificadas das peças usinadas em cada ensaio, esta grandeza foi avaliada em todas as superfícies usinadas, ou seja, em todas as regiões dos ensaios de desgaste, as quais foram obtidas após a usinagem de um volume específico aproximado de 2004 mm<sup>3</sup>/mm. Para isso foi utilizado um rugosímetro portátil fabricado pela Mitutoyo, modelo Surftest SJ-201, montado em um calibrador traçador de altura, conforme a figura 22. Seu sensor é constituído de patim e agulha de diamante com 5  $\mu m$  de raio de

ponta. Periodicamente o rugosímetro era calibrado em um padrão de rugosidade. A bancada de medição foi adaptada em um torno mecânico universal, o que permitiu realizar o deslocamento da unidade de acionamento do rugosímetro com valores conhecidos, nos sentidos longitudinal, transversal e vertical. Com a fixação da peça na placa de três castanhas do torno foi possível fazer o deslocamento angular da mesma, em espaços marcados na placa.

Figura 22 – Bancada para medição de rugosidade.



Em virtude da largura da região a ser avaliada ser de 6 mm, adotou-se comprimento de amostragem de 2,4 mm, que equivale a três *cut-off* de 0,8 mm. O comprimento de medição é composto do comprimento de amostragem, de um *cut-off* para pré-curso e pós-curso e do comprimento de aproximação (0,5 mm). De acordo com a norma DIN 4776, utiliza-se *cut-off* de 0,8 mm para perfis não periódicos cuja faixa de rugosidade  $R_a$  esteja contida entre 0,1 e 2,0  $\mu\text{m}$  (BRÜTSCH-RÜEGGER TOOLS, 2008). Em testes preliminares de avaliação da rugosidade das superfícies usinadas, encontrou-se rugosidade média  $R_a$  de 0,5  $\mu\text{m}$ .

O processo de medição está sujeito a erros, consequentemente, a incertezas. Por essa razão foi necessário aumentar o número de medições em cada região, aumentando assim a probabilidade de acerto. O principal limitador do tamanho da amostra foi o número de medições necessárias e o tempo total. Foram feitos quatro ensaios e em cada um deles foram retificadas trinta e seis regiões, totalizando cento e quarenta e quatro regiões. O tamanho da amostra foi limitado a  $n = 5$ , o que gerou setecentas e vinte medições. O tempo total de medição foi de doze horas.

Todos os valores medidos foram tabulados e, a partir deles, calculou-se a média ( $\bar{x}$ ) e o desvio padrão ( $s$ ) da amostra. Como a variância da população é desconhecida, o intervalo de confiança para a média pode ser calculado pelo coeficiente  $t$  de Student (MONTGOMERY; RUNGER, 2008). Todos os dados são apresentados no Apêndice C.

Durante a inspeção dos corpos de prova foi verificado que, em algumas regiões, havia riscos gerados pelo processo de rebarbação manual. Os mesmos eram facilmente identificados e, quando coincidiam com a posição de medição, girava-se o corpo de prova para que o apalpador do rugosímetro não os percorresse.



## 4 PLANEJAMENTO E EXECUÇÃO EXPERIMENTAL

Com o intuito de avaliar o desgaste radial do rebolo mediante aplicação de fluido lubrificador com tubeira sapata, os experimentos foram executados de tal forma que se pudesse inferir sobre a influência do sistema de lubrificação no processo de retificação. Neste sistema duas grandezas de entrada foram variadas: a vazão de fluido lubrificador através da tubeira e a fenda de trabalho, ou distância entre tubeira e rebolo. Como já citado na revisão bibliográfica, a variação destas duas grandezas exerce influência sobre o comportamento do fluxo de fluido no interior da tubeira. Em consequência da seleção incorreta dos valores destas grandezas, podem ocorrer bolhas de cavitação e/ou entrada de ar na fenda de trabalho, resultando em mau desempenho do processo.

Apesar do escopo da pesquisa ser o estudo do desgaste do rebolo, a avaliação da rugosidade das superfícies das regiões retificadas auxilia no entendimento de certos mecanismos de desgaste que ocorrem tanto no grão abrasivo isolado como na ferramenta. Assim sendo, o planejamento experimental tem como objetivo trazer informações para que se avalie a influência da vazão de fluido lubrificador e da fenda de trabalho sobre o desgaste radial do rebolo e a rugosidade da superfície usinada.

As grandezas de interesse nessa pesquisa foram variadas em quatro ensaios (conforme tabela 5), sendo que as demais grandezas de entrada foram mantidas fixas e seguem listadas abaixo:

- a) Velocidade de corte  $v_s = 100$  m/s;
- b) Velocidade da peça  $v_w = 46$  m/min;
- c) Relação de velocidades  $q = 130$ ;
- d) Taxa de retificação específica  $Z'_w = 10$  mm<sup>3</sup>/(mm.s);
- e) Profundidade de corte  $a_e = 12,5$  µm;
- f) Volume usinado específico  $V'_w = 68135$  mm<sup>3</sup>/mm;
- g) Grau de recobrimento do rebolo  $U_d = 8$ .

**Tabela 5- Grandezas variáveis por ensaio**

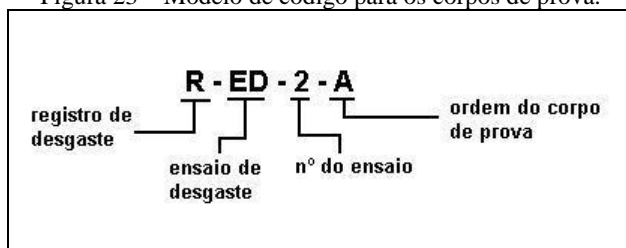
<i>Nº do ensaio</i>	<i>Fenda de trabalho</i>	<i>Vazão de lubrificador</i>
1	0,3 mm	10 l/min
2	0,5 mm	10 l/min
3	0,5 mm	20 l/min
4	0,8 mm	20 l/min

Em cada ensaio foram utilizados quatro corpos de prova, sendo os três primeiros apenas para ensaios de desgaste e o quarto para ensaio de desgaste e registro do desgaste do rebolo. A ordem dos ensaios e os códigos dos corpos de prova são apresentados na tabela 6 e na figura 23, respectivamente.

**Tabela 6- Codificação dos corpos de prova**

<i>Ordem do ensaio</i>	<i>1º corpo de prova</i>	<i>2º corpo de prova</i>	<i>3º corpo de prova</i>	<i>4º corpo de prova</i>
Ensaio 1	ED-1-A	ED-1-B	ED-1-C	R-ED-1-D
Ensaio 2	ED-2-A	ED-2-B	ED-2-C	R-ED-2-D
Ensaio 3	ED-3-A	ED-3-B	ED-3-C	R-ED-3-D
Ensaio 4	ED-4-A	ED-4-B	ED-4-C	R-ED-4-D

Figura 23 – Modelo de código para os corpos de prova.



#### 4.1 VARIAÇÃO DA VAZÃO DE FLUIDO LUBRIRREFRIGERANTE

Para investigar a influência da variação da vazão de fluido sobre os resultados do trabalho foram escolhidos dois valores de vazão, um acima do máximo recomendado e outro dentro da faixa especificada para a tubeira de três canais retos. Lopes (2007) obteve melhor comportamento de escoamento com a vazão  $Q_{fl}$  de 10 e 15 l/min para velocidade de corte alta, assim estipulou-se um valor mínimo (dentro da faixa) de  $Q_{fl} = 10$  l/min e um valor superior de  $Q_{fl} = 20$  l/min.

Esta análise foi feita em duas partes: na primeira comparou-se o ensaio 2 com o ensaio 3, cujos valores de fenda são iguais e varia-se a vazão. Isso permite avaliar a influência da variação de pressão ocasionada pelo aumento da vazão sobre o resultado do trabalho. A vazão de fluido, à medida que é aumentada, eleva a pressão no interior da tubeira,

desde que se mantenha constante a fenda de trabalho. Na interface rebolo e tubeira ocorre uma queda de pressão que pode levar o fluido à vaporizar.

Na segunda parte comparou-se o par formado pelos ensaios 1 e 2, com outro par formado pelos ensaios 3 e 4, pois em cada par foi utilizada uma vazão diferente. Com isso avaliou-se a influência da vazão sobre a rugosidade da peça. Independentemente da forma como ocorre o fluxo no interior da tubeira, a quantidade de fluido que chega à zona de corte é outra causa de variação dos resultados.

Neste trabalho não foi medida a pressão no interior da tubeira, apenas na saída da bomba, porém Lopes (2007) apresenta os valores correspondentes para cada condição de fenda de trabalho, velocidade do rebolo e vazão do fluido. A variação da velocidade do rebolo não altera a pressão na tubeira. A tabela 7 mostra os valores de pressão em função da vazão para uma fenda de trabalho de 0,25mm.

**Tabela 7- Pressão do fluido na tubeira em função da vazão.**

<i>Vazão (l/min)</i>	<i>Pressão (N/m<sup>2</sup>)</i>
5	20000
10	30000
15	40000

Fonte: Lopes (2007) (adaptado).

Vale ressaltar que a tubeira utilizada nos ensaios tem a mesma geometria interna da tubeira utilizada por Lopes (2007). Além disso, o rebolo possui a mesma largura (28 mm) e foi utilizado o mesmo regulador de vazão.

## 4.2 VARIAÇÃO DA FENDA DE TRABALHO

A variação da fenda de trabalho determina o comportamento do fluxo de fluido lubrificador no interior da tubeira e, consequentemente, a condição de lubrificação na zona de corte. Fendas muito baixas dificultam o escoamento do fluido e levam à formação de fluxo turbulento e bolhas de cavitação. Já o uso de fendas muito altas permite a entrada de ar na câmara da tubeira. Os dois extremos, portanto, resultam em entrada de ar na zona de corte (LOPES, 2007).

Adotaram-se três valores de fenda para a realização dos ensaios:

- Fenda de 0,3 mm;
- Fenda de 0,5 mm;



c) Fenda de 0,8 mm.

Fez-se a escolha desses valores em função dos resultados apresentados por Lopes (2007), que definiu como faixa ótima, fendas que variem de 0,4 a 1,0 mm. Procurou-se então trabalhar com um valor abaixo do limite mínimo (0,3 mm) e com dois valores dentro da faixa recomendada (0,5 e 0,8 mm). Acima do limite máximo a tubeira não é mais capaz de impedir a formação do colchão de ar em torno da superfície do rebolo e passa a atuar como uma tubeira de jato livre. Essa condição leva à criação de outra variável que foge ao escopo desta pesquisa.

Para analisar a influência da fenda sobre o resultado do trabalho, foram utilizados os ensaios de 1 a 4, organizados de tal forma que fossem comparados de acordo com a vazão de fluido lubrificador. Nos ensaios 1 e 2 aplicou-se vazão de 10 l/min, enquanto que nos ensaios 3 e 4 a vazão utilizada foi de 20 l/min (ver tabela 4). Esta composição permite avaliar a influência da fenda sobre o resultado do trabalho em duas condições distintas de vazão.

A variação da fenda também altera a pressão do fluido no interior da tubeira. A tabela 8 mostra os valores de pressão para uma vazão de fluido de 10 l/min.

**Tabela 8- Pressão do fluido na tubeira em função da fenda.**

<i>Fenda (mm)</i>	<i>Pressão (N/m<sup>2</sup>)</i>
0,31	30000
0,55	20000
0,89	10000

Fonte: Lopes (2007) (adaptado).

Os valores de fenda apresentados na tabela 8 são próximos aos utilizados nos ensaios 1 a 4, portanto, para efeitos de comparação, foram considerados como iguais.

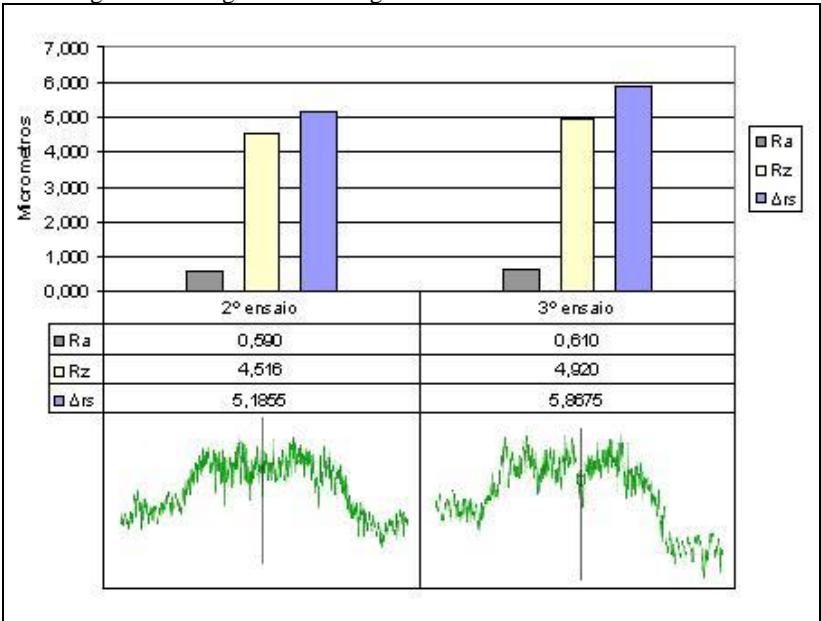
5 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nos itens 5.1 e 5.2 são apresentados os valores de desgaste radial do reboło e rugosidade obtidos com a variação da vazão de lubrificarrefrigerante e da fenda de trabalho, respectivamente.

5.1 INFLUÊNCIA DA VAZÃO DE LUBRIFRREFRIGERANTE SOBRE O DESGASTE RADIAL DO REBOLO E A RUGOSIDADE DA PEÇA

O aumento da vazão resultou no aumento do desgaste radial do reboło em aproximadamente 13%, para uma fenda de 0,5 mm. No ensaio 2 com vazão de 10 l/min a relação de remoção G foi de 10301, enquanto que no ensaio 3, para a vazão de 20 l/min foi de 9104. A diminuição da relação de remoção G está associada ao aumento do desgaste radial do reboło, uma vez que o volume usinado nos dois ensaios foi o mesmo. O aumento do desgaste radial do reboło foi acompanhado de um aumento na rugosidade  $R_z$  em 0,4  $\mu\text{m}$ , como pode ser visto na figura 24, enquanto que a rugosidade  $R_a$  praticamente foi a mesma.

Figura 24 – Rugosidade e desgaste radial obtidos nos ensaios 2 e 3.



Considerando as tabelas 7 e 8 dos itens 4.1 e 4.2 respectivamente, se pode verificar que a pressão aumenta em 10.000 N/m<sup>2</sup> a cada 5 l/min de aumento na vazão. Na tabela 9 são apresentados os valores de pressão na tubeira e desgaste do rebolo em função da vazão.

**Tabela 9- Desgaste do rebolo em função da vazão.**

<i>Ensaio</i>	<i>Fenda (mm)</i>	<i>Vazão (l/min)</i>	<i>Pressão (N/m<sup>2</sup>)</i>	<i>Relação de remoção G</i>	<i>Ar<sub>s</sub> (μm)</i>
1	0,3	10	30000	10793	4,9494
2	0,5	10	20000	10301	5,1855
3	0,5	20	40000	9104	5,8675
4	0,8	20	30000	11526	4,6345

Para o aumento da vazão houve um aumento de pressão correspondente, que resultou no aumento do desgaste radial. A variação destes parâmetros de entrada se reflete sobre a forma do escoamento do fluido e, sob determinadas circunstâncias, pode gerar bolhas de cavitação e escoamento turbulento. O início da cavitação pode ser caracterizado pelo coeficiente de Thoma, cujo valor depende do tipo de instalação. Nesse caso o conjunto formado por tubeira e rebolo é comparável a uma máquina de fluxo, pois o rebolo exerce um efeito de bombeamento do fluido contido no interior da tubeira (BRINKSMEIER *et al* 1998). Nos ensaios 2 e 3, a velocidade de escoamento do fluido na saída da tubeira é inferior à velocidade do rebolo, portanto o fluido é acelerado e ocorre uma queda de pressão na interface fluido rebolo.

Lopes (2007) verificou que, para uma vazão de 10 l/min, o início da cavitação ocorre com uma fenda de 0,3 mm e torna-se mais crítica à medida que a fenda diminui. Neste caso o fator de Thoma ( $\sigma$ ) para início de cavitação é  $\sigma = 9,5 \times 10^{-3}$  e valores inferiores a esse correspondem a condições de escoamento sem perturbações, obtidas com fendas entre 0,4 e 1,0 mm. Acima de 1,0 mm, como já citado na revisão bibliográfica, ocorre entrada de ar na tubeira, afastando o fluido lubrificador na superfície do rebolo. O fator de Thoma ( $\sigma$ ) é calculado pela equação 5.1, como segue:

$$\sigma = \frac{P_0 - P_{sat}}{\frac{1}{2} \times \rho \times v_{fl}^2} \quad (5.1)$$

No ensaio 2, com a vazão ( $Q_f$ ) de 10 l/min o fluido escoaria com a velocidade de 19,8 m/s através da fenda, cuja área tem 14 mm<sup>2</sup>, porém o rebolo impõe um aumento de velocidade de 80,2 m/s. Dessa forma obtém-se  $\sigma = 4,54 \times 10^{-3}$ , indicando um escoamento sem formação de bolhas de cavitação. Já no ensaio 3, o resultado de  $\sigma = 13,10 \times 10^{-3}$  é superior ao  $\sigma$  de referência, logo pressupõe-se que ocorreu cavitação. A variação da vazão alterou a condição de escoamento de modo a aumentar o desgaste radial do rebolo. Segundo Klocke *et al* (2000), a principal função da tubeira sapata é garantir o preenchimento de todos os poros do rebolo com fluido lubrificador, pois somente assim se garante sua presença na zona de corte – o fluxo excedente pode induzir forças normais ao corte causando erros dimensionais e geométricos na peça. Um fluxo turbulento, com formação de bolhas, impede que os poros do rebolo sejam repletamente inundados, reduzindo a eficiência da lubrificação.

Em todos os ensaios houve aumento da rugosidade ( $R_z$ ) com o aumento do volume usinado específico, porém a taxa de variação foi diferente para cada valor de vazão, independentemente do valor de fenda. Nos ensaios 1 e 2, com vazão de 10 l/min, a rugosidade variou menos do que a obtida nos ensaios 3 e 4, onde se utilizou vazão de 20 l/min (ver figura 25). As condições de lubrificação têm forte influência sobre os mecanismos de desgaste dos gumes que afetarão, por sua vez, a topografia do rebolo. Segundo König (2002), a refrigeração adequada favorece a formação do cavaco e isto gera aumento da força tangencial, logo aumentam os esforços sobre o grão abrasivo. Com o aumento do volume usinado o microdesgaste do gume torna-se mais acentuado, resultando em aumento da rugosidade.

Na retificação com CBN e uso de óleo integral, a força tangencial e a rugosidade são menores do que as obtidas com emulsões. O efeito de refrigeração mais intensa provocado pela emulsão proporciona uma característica de auto-afiação do gume, que ocorre com a alternância de dois fenômenos: desgaste abrasivo e microfratura. O progresso do desgaste resulta em fratura e perda de grãos, que levarão à diminuição da densidade de gumes e aumento da rugosidade. As observações sobre esse fenômeno apresentadas por Fujimoto e Ichida (2006) sugerem que o mesmo tenha ocorrido nos ensaios 1 a 4, devido ao comportamento das curvas de rugosidade apresentados na figura 26.

Figura 25 – Comportamento da rugosidade (linearizado) como função do volume usinado específico.

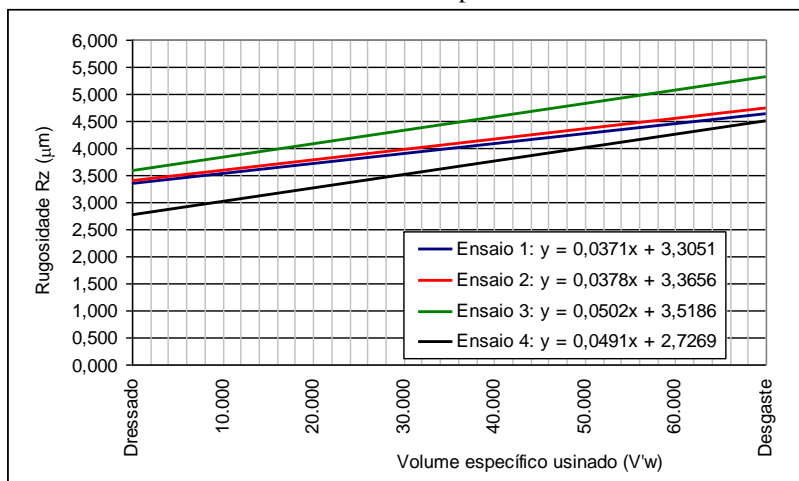
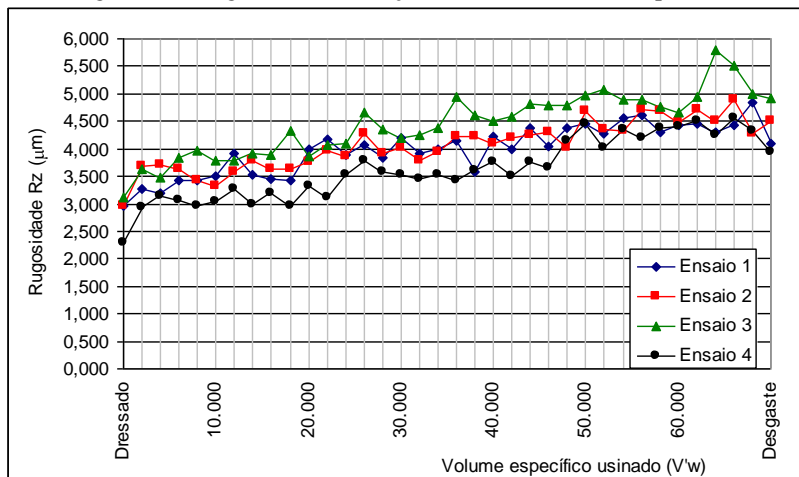


Figura 26 – Rugosidade em função do volume usinado específico.



Para taxas de retificação específica baixas, como a utilizada em todos os ensaios ( $10 \text{ mm}^3/\text{mm.s}$ ), a ação lubrificante do fluido lubrificador é menos eficiente, como visto por Tawakoli *et al* (2007),

que comparou os resultados de desgaste de rebolos de CBN obtidos com óleo integral e emulsão e concluiu que a diferença nos resultados é menor para taxas menores. Algo semelhante ocorre para velocidades de corte mais altas, mantidos os demais parâmetros fixos. A explicação para isso é que sob estas condições são obtidas menores espessuras de cavaco e, conseqüentemente, menores forças de corte. Nesse caso a ação refrigerante do fluido tem uma importância maior.

## 5.2 INFLUÊNCIA DA FENDA DE TRABALHO SOBRE O DESGASTE RADIAL DO REBOLO E A RUGOSIDADE DA PEÇA

Dentro da faixa recomendada de fendas, a variação de seus valores não traz alterações nos resultados de maneira isolada. Há sempre uma dependência desta com a vazão aplicada, ou melhor, com o coeficiente de Thoma resultante da combinação dos dois parâmetros. O uso da fenda de 0,3 mm no ensaio 1, a qual está abaixo do valor recomendado por Lopes (2007), deveria trazer piora no resultado de desgaste do reboło, no entanto o desgaste radial foi um pouco menor que o obtido com a fenda de 0,5 mm no ensaio 2 – cerca de 4,5%, conforme figura 27. O coeficiente de Thoma obtido no ensaio 2 foi de  $\sigma = 4,54 \times 10^{-3}$ . A tabela 10 apresenta os valores de  $\sigma$  obtidos em cada ensaio.

O aumento da fenda no ensaio 2 foi responsável pela redução da pressão da tubeira, o que levou a uma condição de turbulência. Nessa situação a força de repulsão exercida pelo reboło contra o fluido deixa de ser equilibrada pela pressão do fluido. Assim pode ser estabelecido um valor mínimo aceitável para  $\sigma$ , o qual formará em conjunto com o  $\sigma$  de referência, uma faixa ótima de pressão.

Na tabela 10 é visto que entre os ensaios 2 e 3, cujos valores de fenda são iguais, ocorreu a redução da relação de remoção G em 12% aproximadamente. Isso comprova que o comportamento do fluxo não é dependente exclusivamente da fenda de trabalho. O ensaio 3 apresentou o pior resultado de desgaste radial do reboło e a maior rugosidade  $R_z$ , que, novamente, podem ser associados à presença de bolhas de cavitação na tubeira. Quando a fenda foi ajustada em 0,8 mm no ensaio 4, a relação de remoção G aumentou em 21% em relação ao ensaio 3.

Figura 27 – Rugosidade e desgaste radial obtidos nos ensaios 1 e 2.

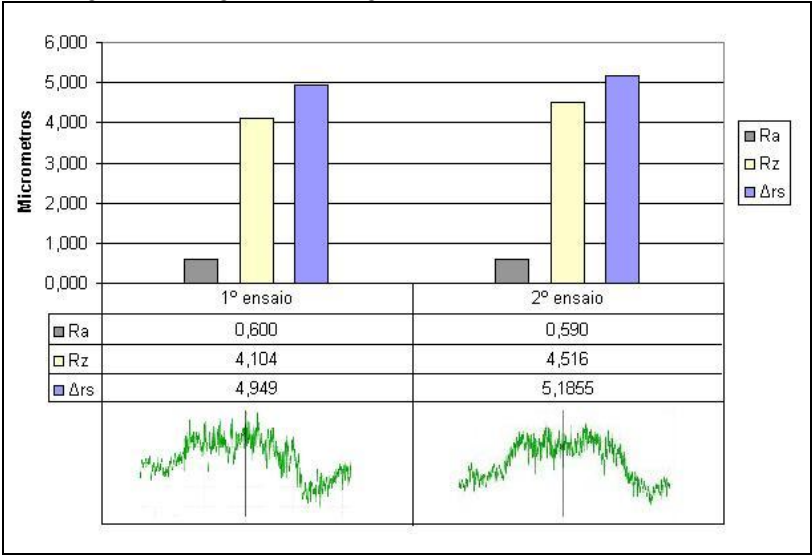
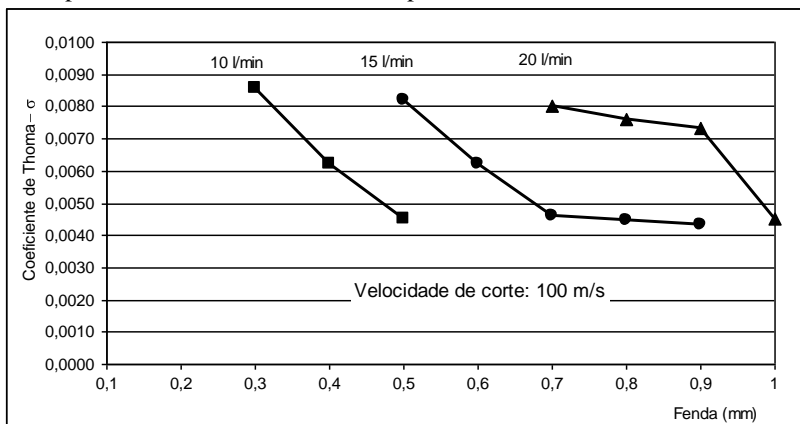


Tabela 10- Coeficiente de Thoma obtido em cada ensaio.

Ensaio	Fenda (mm)	Vazão (l/min)	Coeficiente de Thoma $\sigma$	Relação de remoção G	$\Delta r_s$ ( $\mu m$ )	Tipo de escoamento
1	0,3	10	$8,58 \times 10^{-3}$	10793	4,9494	Laminar
2	0,5	10	$4,54 \times 10^{-3}$	10301	5,1855	Turbulento
3	0,5	20	$13,00 \times 10^{-3}$	9104	5,8675	Cavitação
4	0,8	20	$7,61 \times 10^{-3}$	11526	4,6345	Laminar

Com base nos resultados de desgaste e rugosidade, conclui-se que o ajuste da fenda deve ser feito em conjunto com a vazão estabelecida, respeitando os limites de coeficiente de Thoma  $4,54 \cdot 10^{-3} < \sigma < 9,5 \cdot 10^{-3}$ , para uma dada velocidade de corte. A partir da equação 5.1 foram calculados os valores de  $\sigma$  para vazões de 10, 15 e 20 l/min, fendas variando de 0,1 a 1,0 mm em incrementos de 0,1 mm e velocidade de corte de 100 m/s. Com aqueles valores calculados foi criado um gráfico para a seleção da fenda de acordo com a vazão aplicada (ver figura 28).

Figura 28 – Coeficiente de Thoma e fenda entre tubeira e rebolo em dependência da velocidade de corte para três valores de vazão de fluido.



O gráfico da figura 28 mostra que são admitidos valores de fendas entre 0,3 e 1,0 mm, o que permite longos períodos de retificação sem necessidade de reajuste da posição da tubeira. Para um rebolo com revestimento abrasivo de 5,0 mm de espessura, o posicionamento da tubeira será feito apenas oito vezes ao longo de toda sua vida. Se a soma do desgaste radial do rebolo acrescido do valor dressado ( $4 \times 5 \mu\text{m}$ ) resultar em  $26 \mu\text{m}$ , a fenda será reajustada a cada vinte e sete ciclos de dressamento. Para as condições de ensaio, isto equivale a um reajuste da fenda a cada  $1840000 \text{ mm}^3/\text{mm}$  de volume específico usinado.

O sistema de jato livre não permite a obtenção de tais resultados, como visto por Weingärtner (2005), que aplicou fluido com vazão de 84 l/min e pressão de alimentação de  $500000 \text{ N/m}^2$ . Após a usinagem de um volume específico de  $24800 \text{ mm}^3/\text{mm}$ , o desgaste radial do rebolo foi de  $26 \mu\text{m}$ , o que corresponde à relação de remoção  $G$  de 755. Com a sapata é possível reduzir a vazão para 20 l/min, com pressão de alimentação de  $30000 \text{ N/m}^2$  e obter desgaste radial de  $4,6 \mu\text{m}$  ( $G = 11526$ ), após a usinagem de  $68135 \text{ mm}^3/\text{mm}$  de volume específico.





## 6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Empregando-se fluidos de corte baseados em emulsão de óleo em água na retificação de ferro fundido com rebolos de CBN em elevadas velocidades de corte, conclui-se que, pela melhor lubrificação, o desgaste dos rebolos de CBN não é influenciado pela presença de vapores de água superaquecidos e que se obtém um aumento da vida do rebolo de 15 vezes em relação à uma lubrificação feita com jato livre. Com o emprego da tubeira tipo sapata otimizada por Lopes (2007), foi possível obter uma relação de remoção  $G$  de 11526, 42% melhor que o resultado obtido por Weingärtner (2005), com uma tubeira tipo sapata de canal simples. Para um volume retificado específico de  $68135 \text{ mm}^3/\text{mm}$ , o desgaste radial do rebolo foi de  $4,6 \text{ }\mu\text{m}$  e a rugosidade final  $R_z$  de  $3,94 \text{ }\mu\text{m}$ . O baixo desgaste radial, associado à pequena variação da rugosidade da superfície usinada, permite longos períodos de usinagem sem interrupções para condicionamento do rebolo. Com isto se reduzem custos com parada de máquina e com desgaste da ferramenta de perfilamento. Os erros dimensionais e geométricos da peça também são reduzidos, melhorando os índices de qualidade do processo. A redução do desgaste radial do rebolo é oriunda da melhoria da geometria interna da tubeira e da seleção correta dos parâmetros de entrada, vazão de fluido e fenda de trabalho.

Ao analisar-se a influência da fenda entre tubeira e rebolo e da vazão de fluido lubrificante sobre o desgaste radial do rebolo, conclui-se que há uma relação entre o coeficiente de cavitação e o desgaste. O coeficiente de cavitação, calculado pelo fator de Thoma ( $\sigma$ ), expressa um intervalo em que o comportamento do fluxo é menos turbulento. Para a tubeira tipo sapata de três canais retos, o intervalo  $4,5 \cdot 10^{-3} < \sigma < 9,5 \cdot 10^{-3}$  corresponde aos valores de fenda possíveis. O limite inferior de  $\sigma$  corresponde a fendas muito altas, onde a pressão hidrodinâmica do fluido não é mais capaz de vencer a força de repulsão exercida pelo rebolo. Sob condições extremas ocorre entrada de ar na câmara da tubeira, formando um colchão de ar sobre a superfície do rebolo. Já o limite superior de  $\sigma$  retrata o início da formação de bolhas de cavitação que, por sua vez, advém da regulagem de uma fenda muito baixa ou vazão muito alta. Essa condição é responsável pela redução mais drástica da relação  $G$ . Com auxílio do gráfico apresentado na figura 28 é possível selecio-

nar valores de fenda entre 0,3 e 1,0 mm, para uma vazão de 10, 15 ou 20 l/min.

A variação da vazão também exerce influência sobre o comportamento da rugosidade. Com vazão de 10 l/min, a rugosidade  $R_z$  aumenta em média 3,75% a cada 2000 mm<sup>3</sup>/mm de volume específico usinado. Já com vazão de 20 l/min, a rugosidade aumenta em 5% para o mesmo volume específico usinado. Segundo König (2002), a refrigeração mais adequada da zona de corte favorece a formação do cavaco, pela redução das deformações elasto-plásticas do material, o que resulta em aumento da rugosidade. Quando associado a uma condição adequada de lubrificação, um pequeno aumento na vazão leva a menor desgaste do rebolo, porém, o excesso de fluido não melhora continuamente o resultado do trabalho. Se a vazão excede a capacidade de transporte de fluido pelos poros do rebolo, são induzidas forças normais sobre o grão abrasivo, que aumentam a vibração e os erros dimensionais e geométricos da peça (KLOCKE *et al* 2000). Sob as condições de ensaio nesta pesquisa, a vazão não deve exceder 20 l/min, sendo que para 15 l/min, o intervalo correspondente dos valores de fenda é maior.

Os valores de relação de remoção  $G$  obtidos com a tubeira tipo sapata e emulsão na retificação de ferro fundido nodular são muito próximos aos obtidos com outros tipos de tubeira para aplicação de óleo integral. A característica de autolubrificação oferecida pelos nódulos de grafita compensa a menor capacidade lubrificante da emulsão, permitindo a substituição do óleo integral na retificação do ferro fundido nodular. Tkaya (2009) demonstrou o princípio de formação de cavaco deste material e comprovou a presença de grafita na superfície usinada.

A redução da vazão de fluido e a substituição de óleo por emulsão vão de encontro a questões econômicas e ecológicas que viabilizam o emprego da tubeira tipo sapata, na retificação de ferro fundido com rebolos de CBN. Em comparação com a emulsão, o tratamento do óleo é muito mais difícil e apresenta um custo muito superior, devido à complexidade do sistema de filtragem. Enquanto que o sistema de limpeza da emulsão pode ser composto de um separador magnético de cavacos e um filtro por gravidade de papel, para limpeza do óleo é necessário um filtro aluvião, cuja instalação é mais complexa e potência de acionamento muito maior, superando a potência de acionamento do eixo-árvore. Deve ainda ser considerada a grande diferença da potência necessária para acelerar o fluido contido na tubeira, que também é muito maior para o óleo integral. Para emulsão de 5% de óleo em água aplicada com a tubeira tipo sapata de três canais

retos, o consumo de potência é de apenas 1,6 kW (LOPES, 2007). Também, as baixas pressões empregadas reduzem muito os riscos de acidente e a formação de névoas, prejudiciais à saúde do operador.

A partir das observações feitas neste trabalho, são feitas sugestões para trabalhos futuros, com base no emprego da tubeira tipo sapata:

- a) Analisar a influência da velocidade de corte e da taxa de retificação específica sobre o resultado do trabalho. O cálculo de  $\sigma$  para velocidades de corte diferentes de 100 m/s mostra que podem ser adotados outros valores de fenda de acordo com a vazão. Teoricamente, com a redução da velocidade de corte, a vazão e a fenda também devem ser reduzidas, porém não é levado em conta o efeito dos parâmetros de corte;
- b) Determinar o máximo desgaste de rebolo admissível antes do dressamento, por meio da avaliação da topografia do rebolo e da integridade da superfície e subsuperfície da peça. Apenas o conhecimento da taxa de desgaste não é suficiente para saber se o rebolo está em condições de produzir peças com a qualidade requerida;
- c) Estabelecer os parâmetros de lubrificação para rebolos com outras classes de abrasivos, como os convencionais;
- d) Avaliar a influência da contaminação por grafita sobre a eficiência do fluido lubrificante. Durante a execução dos ensaios pode-se observar a alteração da coloração do fluido, evidenciando uma grande presença de grafita. Como a mesma apresenta uma característica lubrificante, pode influenciar positivamente a usinagem.



## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Resolução n. 10, de 07 de mar. 2007. **Diário Oficial da União**, sexta-feira, 09 de mar. 2007. n. 47, seção 1, p. 65-66. Disponível em: <<http://www.in.gov.br/visualiza/index.jsp?data=09/03/2007&jornal=1&pagina=65&totalArquivos=140>>. Acesso em: 05 de março de 2011
- ALBERTAZZI, A.; SOUSA, A. **Fundamentos de metrologia científica e industrial**. Barueri: Manole, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6175: processos mecânicos de usinagem**. Rio de Janeiro, 1971.
- BERTALAN, Cláudio. **Retificação com rebolos de nitreto de boro cúbico em máquinas ferramentas convencionais**. 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.
- BET, L. **Estudo da medição da textura de superfícies com sondas mecânicas e com sondas ópticas tipo seguidor**. 1999. 243 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Relatório do ministério do meio ambiente para o conselho nacional do meio ambiente (CONAMA), conforme exigência do artigo 9º da resolução CONAMA nº 362/2005 que trata de óleos lubrificantes usados e/ou contaminados**. [Brasília]: MMA, 2009. Disponível em: <[http://portaleira-domas.com.br/pub/OleoUsado/Forum\\_e\\_Seminarios/Relatorio\\_GMP\\_2009/Relatorio\\_GMP\\_CONAMA\\_2009.pdf](http://portaleira-domas.com.br/pub/OleoUsado/Forum_e_Seminarios/Relatorio_GMP_2009/Relatorio_GMP_CONAMA_2009.pdf)>. Acesso em: 05 de março de 2011
- BRINKSMEIER, E. et al. Modelling and optimization of grinding processes. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 9, n. 4, p. 303-314, 1998. Disponível em:

<<http://www.springerlink.com/content/g8w4360243684311/fulltext.pdf>>. Acesso em: 10 de maio de 2011.

BRINKSMEIER, E.; et al. Advances in modeling and simulation of grinding processes. **CIRP annals: manufacturing technology**, v. 55, n. 2, p. 667–696, 2006. disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2006.10.003>>. Acesso em: 19 de janeiro de 2011.

BRINKSMEIER, E.; HEINZEL, C.; WITTMANN, M. Friction, cooling and lubrication in grinding. **CIRP annals: manufacturing technology**, v. 48, n. 2, p. 581– 598, 1999. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63236-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63236-3)>. Acesso em: 26 de abril de 2010

BRÜTSCH-RÜEGGER TOOLS. **Mitutoyo surfest SJ-201 P**: surface roughness tester. Brütisch-Rüegger: Zürich. 2008.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 6. ed.. São Paulo: ABM, 1988.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução n. 362, de 23 de junho de 2005. **Diário Oficial da União**, segunda-feira, 27 de jun. 2005. n. 121, seção 1, p. 128-130. Disponível em: <<http://www.in.gov.br/visualiza/index.jsp?data=27/06/2005&jornal=1&pagina=128&totalArquivos=168>>. Acesso em: 05 de março de 2011

D'EVELYN, M. P.; TANIGUCHI, T. Elastic properties of translucent polycrystalline cubic boron nitride as characterized by dynamic resonance method. **Diamond and Related Materials**, v. 8, p. 1522 – 1526, 1999. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S0925-9635\(99\)00077-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0925-9635(99)00077-1)>. Acesso em: 18 de maio de 2011

DOMAN, D. A.; WARKENTIN, A.; BAUER, R. A survey of recent grinding wheel topography models. **International journal of machine tools & manufacture**, v. 1, n. 46, p. 343–352, 2005. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.05.013>>. Acesso em: 30 de junho de 2010

DROZDA, T. J.; WICK, C. **Tool and manufacturing engineers handbook**: volume 1: machining. 4. ed. Dearborn: SME, 1983.

FUJIMOTO, M. et al. Characterization of wheel surface topography in CBN grinding. **JSME International Journal**, v. 49, n.1, p. 106 – 113, 2006.

FUJIMOTO, M.; ICHIDA, Y. Micro fracture behavior of cutting edges in grinding using single crystal cBN grains. **Diamond and related material**, v. 17, p. 1759–1763, 2008. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.diamond.2008.03.008>>. Acesso em: 16 de maio de 2011

GOVEKAR, E.; BAUS, A.; GRADIŠEK, J.; KLOCKE, F.; GRABEC, I. A new method for chatter detection in grinding. **CIRP annals: manufacturing technology**, v. 51, n. 1, p. 267– 270, 2002. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61514-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61514-5)>. Acesso em: 19 de janeiro de 2010

GUESSER, W. L. **Propriedades mecânicas dos ferros fundidos**. São Paulo: Editora Blücher, 2009.

GUO, C. et al. Power and wheel wear for grinding nickel alloy with plated CBN wheels. **CIRP annals: manufacturing technology**, v. 56, n. 1, p. 343 – 346, 2007. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2007.05.079>>. Acesso em: 10 de dezembro de 2010

GUO, C. et al. Temperatures and energy partition for grinding with vitrified CBN wheels. **CIRP annals: manufacturing technology**, v. 48, n. 1, p. 247 – 250, 1999. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63176-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63176-X)>. Acesso em: 10 de dezembro de 2010

GVINIASHVILI, V. K.; WOOLEY, N. H.; ROWE, W. B. Useful coolant flowrate in grinding. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 44, n. 6, p. 629–636, 2004. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2003.12.005>>. Acesso em: 09 de janeiro de 2011



HECKER, R. L.; LIANG, S. Y. Predictive modeling of surface roughness in grinding. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 43, n. 8, p. 755–761, 2003. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S0890-6955\(03\)00055-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0890-6955(03)00055-5)>. Acesso em: 19 de fevereiro de 2011

HERMAN, D.; KRZOS, J. Influence of vitrified Bond structure on radial wear of cBN grinding wheels. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, n. 14 p. 5377–5386, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.03.013>>. Acesso em: 16 de fevereiro de 2011

JACKSON, M. J. et al. High-speed grinding with CBN grinding wheels: applications and future technology. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 110, p. 78–88, 2001. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00869-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00869-4)>. Acesso em: 10 de novembro de 2010

KLOCKE, F. **Manufacturing Processes 2: grinding, honing, lapping**. Berlin: Springer, 2009.

KLOCKE, F. **Manufacturing Technology I: exercise 9: general principles of machining with a geometrically undefined cutting edge**. Aachen: Rheinisch-Westfaelische Technische Hochschule Aachen, 2004. Disponível em: <[http://www.wzl.rwth-aachen.de/en/629c52491e476b86c1256f580026aef2/mt\\_i\\_exercise\\_9.pdf](http://www.wzl.rwth-aachen.de/en/629c52491e476b86c1256f580026aef2/mt_i_exercise_9.pdf)>. Acesso em: 18 jun. 2011.

KLOCKE, F.; KÖNIG, W. Appropriate conditioning strategies increase the performance capabilities of vitrified-bond CBN grinding wheels. **CIRP annals: manufacturing technology**, v. 44, n. 1, p. 305–310, 1995. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62331-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62331-2)>. Acesso em: 19 de janeiro de 2011

KLOCKE, Fritz; BAUS, A.; BECK, T. Coolant induced forces in CBN high speed grinding with shoe nozzle. **Annals of the CIRP**, v. 49, n. 1, p. 241–244, 2000. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62937-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62937-0)>. Acesso em: 19 de janeiro de 2011

KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Tecnologia da usinagem com ferramentas de corte de geometria não definida**. Florianópolis: Weingaertner, 2002.

KREBS & RIEDEL SCHLEIFENSCHLEIBENFABRIK. **Krebs CBN: diamant**. Bad Karishafen, 2006.

LOPES, J. R. **Análise do comportamento do fluxo de fluido lubrificante em tubos do tipo sapata para a retificação em alta velocidade**. 2007. 166 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

MARINESCU, I. D. et al. **Handbook of machining with grinding wheels**. Boca Raton: CRC Press, 2007.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, D. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

RABENSTEIN, A. et al. Microbial degradation of water miscible metal working fluids. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 63, n.8, p. 1023 – 1029, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ibiod.2009.07.005>>. Acesso em: 20 de janeiro de 2011

STOLARSKI, T. A. **Tribology in machine design**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1990.

TAWAKOLI, T. et al. Influence of the type of coolant lubricant in grinding with CBN tools. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 47, n. 5, p. 734 – 739, 2007. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.09.010>>. 10 de agosto de 2010

TKAYA, M. B. et al. On some tribological effects of graphite nodules in wear mechanism of S. G. cast iron: finite element and experimental analysis. **Wear**, v. 267, p. 535–539, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2009.01.058>>. Acesso em: 20 de março de 2011

TÖNSHOFF, H. K. et al. Grinding processes achievements and their consequences on machine tools challenges and opportunities. **CIRP annals: manufacturing technology**, v. 47, n. 2, p. 651 – 668, 1998. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63247-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63247-8)>. Acesso em: 19 de janeiro de 2011

TÖNSHOFF, H. K. et al. Modelling and simulation of grinding processes. **CIRP annals: manufacturing technology**, v. 41, n. 2, p. 677–688, 1992. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63254-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63254-5)>. Acesso em: 19 de janeiro de 2011

TUPY. **FUCO® perfis fundidos**: catálogo técnico CT 0408. Tupy: Joinville, 2008.

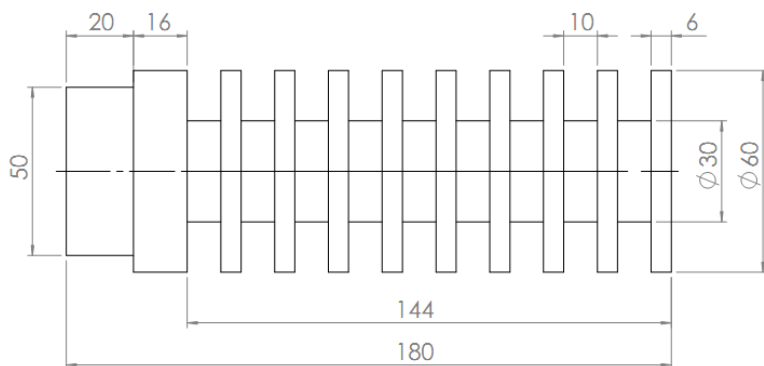
U. S. DEPARTMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES. **What you need to know about occupational exposure to metalworking fluids**. DHHS (NIOSH): Atlanta, 1998.

VENKATESH, V. C.; IZMAN, S. **Precision Engineering**. New Delhi: McGraw-Hill, 2007.

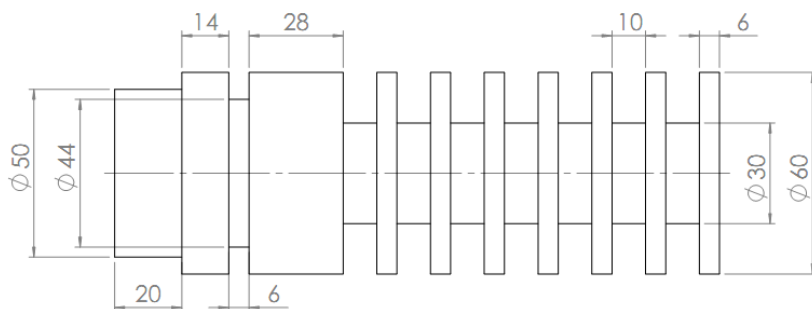
WEINGÄRTNER, E. **Influência do sistema de alimentação de fluido lubrificante na retificação com rebolos de CBN**. 2005. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

WINTER. **Catalogue no. 1**: automotive, turbine, bearings: winter diamond and CBN tools for the automotive, turbine and bearing industries. Saint-Gobain Abrasives: Schützenwall: 2009. Disponível em: <<http://www.winter-superabrasives.com/uploadedFiles/SGwintersuperabrasives/Documents/WINTER-catalogue-no-1-diamond-and-cBN-tools.pdf>>. Acesso em: 20 de novembro de 2010

## APÊNDICE A –Dimensões dos corpos de prova



Corpo de prova para ensaio de desgaste – ED.

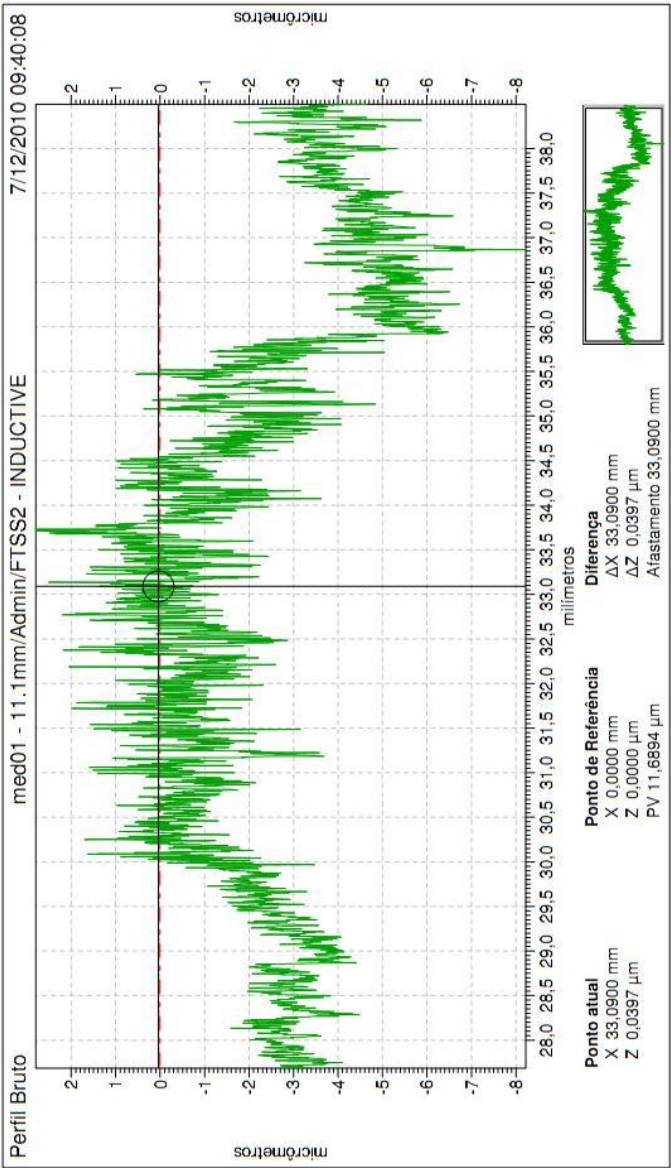


Corpo de prova para ensaio e registro de desgaste – RED.



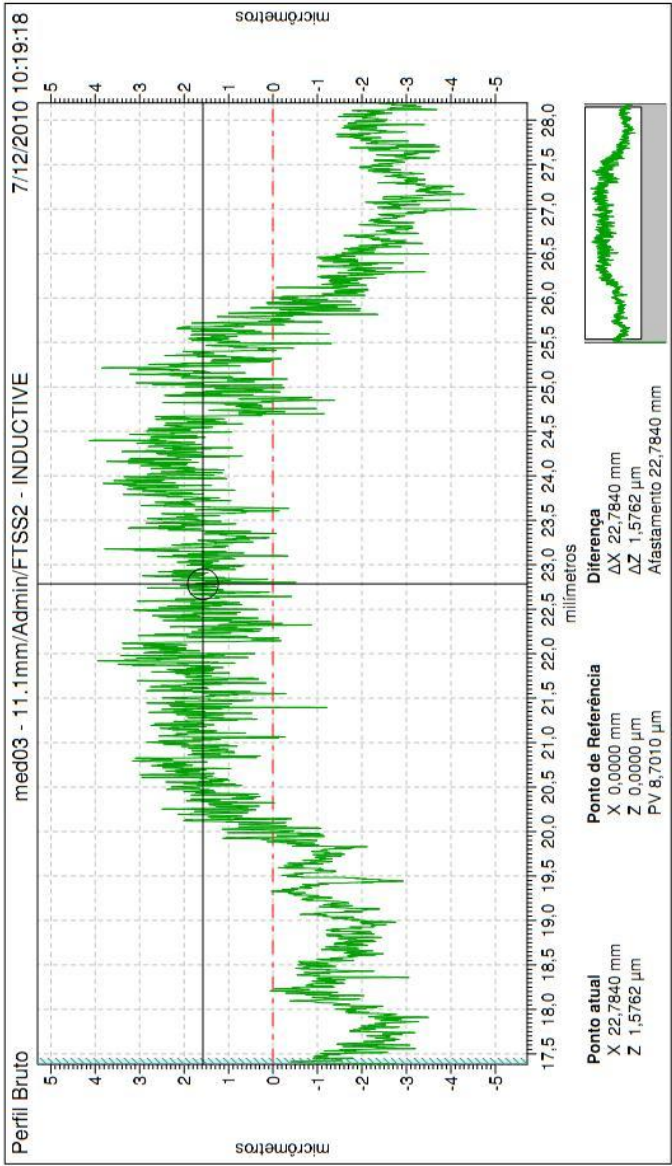
APÊNDICE B – Gráficos dos perfis brutos e filtrados do registro de desgaste

Perfil bruto de rugosidade – corpo de prova RED-1-D – ensaio 1.





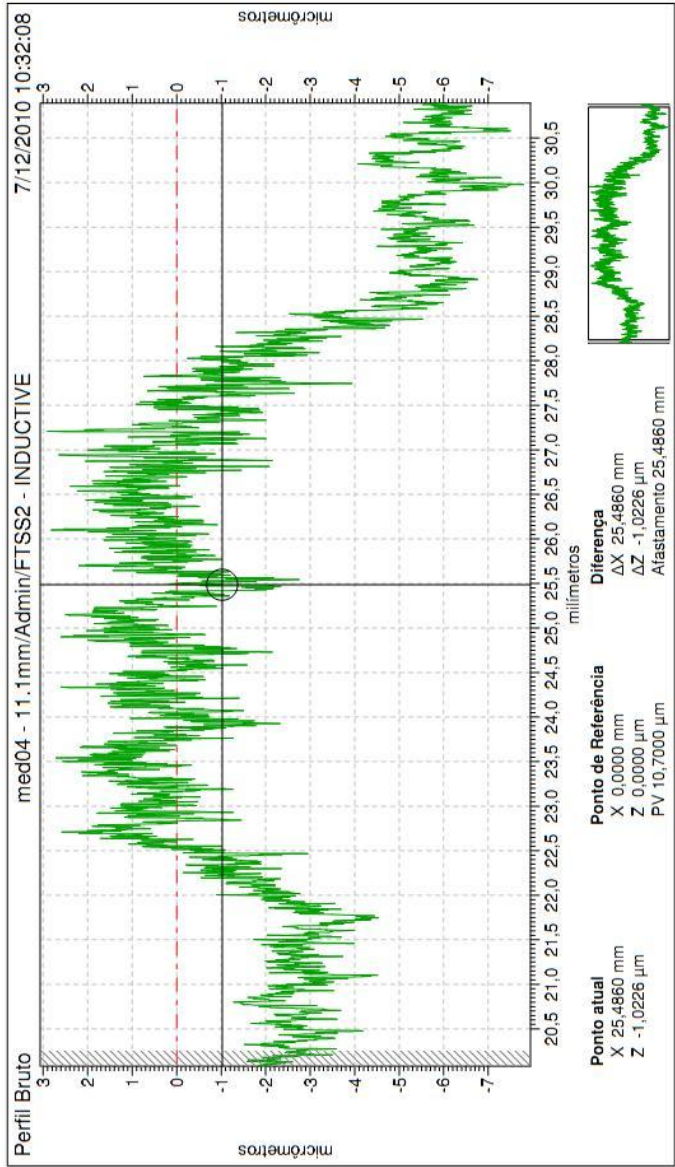
Perfil bruto de rugosidade – corpo de prova RED-2-D – ensaio 2.





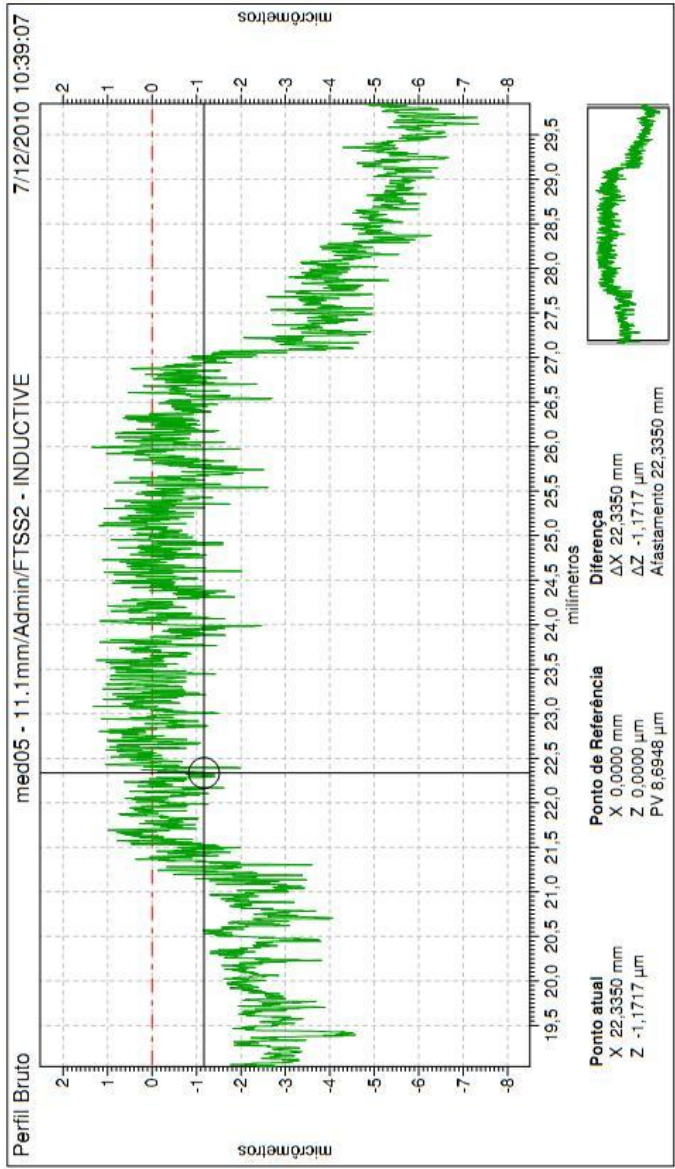


Perfil bruto de rugosidade – corpo de prova RED-3-D – ensaio 3.





Perfil bruto de rugosidade – corpo de prova RED-4-D – ensaio 4.





**APÊNDICE C – Valores de rugosidade medidos em todas as regiões usinadas**

Em cada ensaio foram retificadas trinta e quatro regiões, indicadas em ordem numeral. A região indicada como *dressamento* corresponde à superfície retificada com a parte do rebolo que não sofreu desgaste, ou seja, logo após o *dressamento*. A região *desgaste* corresponde à superfície da peça onde foi feito o registro de desgaste do rebolo, cuja condição é muito semelhante à 34ª região.

O desvio padrão das amostras é desconhecido e o tamanho das amostras é reduzido, por isso o intervalo de confiança da média foi calculado com base na distribuição (t), por meio da equação a seguir:

$$\bar{x} - t_{\alpha/2, n-1} \cdot s / \sqrt{n} \leq \mu \leq \bar{x} + t_{\alpha/2, n-1} \cdot s / \sqrt{n}$$

- Em que:
- $\bar{x}$  = média da amostra;
  - $t_{\sigma, v}$  = coeficiente de Student;
  - $n$  = tamanho da amostra;
  - $v$  = graus de liberdade (n-1);
  - $\alpha$  = confiabilidade;
  - $s$  = desvio padrão da amostra.

Para que o intervalo de confiança não se tornasse muito grande, foi estipulada uma confiabilidade de 95%, a partir da qual encontrou-se  $t_{\sigma, v}$  de 2,776 disponível na tabela de pontos percentuais da distribuição t. No quadro de valores de rugosidade medidos é apresentado t/2, que corresponde à metade da distribuição t.

Rugosidade (Ra) e (Rz) em cada região.

		Ensaio 1		Ensaio 2		Ensaio 3		Ensaio 4	
Região	Posição	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz
1	1	0,560	3,610	0,570	3,390	0,500	3,360	0,390	2,740
	2	0,430	2,960	0,520	3,020	0,540	3,180	0,330	2,610
	3	0,500	3,410	0,530	4,420	0,540	4,020	0,440	3,090
	4	0,420	3,270	0,690	4,040	0,610	3,920	0,450	3,020
	5	0,470	3,080	0,460	3,490	0,570	3,680	0,480	3,220
	$\bar{x}$	<b>0,476</b>	<b>3,266</b>	<b>0,554</b>	<b>3,672</b>	<b>0,552</b>	<b>3,632</b>	<b>0,418</b>	<b>2,936</b>
	s	0,057	0,259	0,086	0,555	0,041	0,358	0,059	0,253
	t/2	<b>0,071</b>	<b>0,321</b>	<b>0,106</b>	<b>0,689</b>	<b>0,051</b>	<b>0,445</b>	<b>0,073</b>	<b>0,314</b>

		Ensaio 1		Ensaio 2		Ensaio 3		Ensaio 4	
Região	Posição	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz
2	1	0,500	3,370	0,560	3,400	0,530	3,390	0,530	3,110
	2	0,430	3,400	0,470	3,730	0,520	3,490	0,690	3,040
	3	0,440	2,960	0,440	3,720	0,500	3,400	0,430	3,450
	4	0,450	2,920	0,580	4,040	0,510	3,430	0,400	3,170
	5	0,500	3,360	0,570	3,640	0,520	3,640	0,440	2,930
	x□	<b>0,464</b>	<b>3,202</b>	<b>0,524</b>	<b>3,706</b>	<b>0,516</b>	<b>3,470</b>	<b>0,498</b>	<b>3,140</b>
	s	0,034	0,240	0,064	0,229	0,011	0,103	0,118	0,195
	t/2	<b>0,042</b>	<b>0,298</b>	<b>0,080</b>	<b>0,285</b>	<b>0,014</b>	<b>0,128</b>	<b>0,146</b>	<b>0,242</b>
3	1	0,500	3,270	0,600	3,730	0,500	3,640	0,410	3,330
	2	0,480	2,950	0,520	3,880	0,530	3,930	0,450	2,810
	3	0,520	3,440	0,590	3,580	0,580	3,600	0,410	2,860
	4	0,530	3,880	0,510	3,510	0,560	3,980	0,380	2,670
	5	0,560	3,560	0,540	3,460	0,610	4,090	0,490	3,650
	x□	<b>0,518</b>	<b>3,420</b>	<b>0,552</b>	<b>3,632</b>	<b>0,556</b>	<b>3,848</b>	<b>0,428</b>	<b>3,064</b>
	s	0,030	0,345	0,041	0,172	0,043	0,216	0,043	0,411
	t/2	<b>0,038</b>	<b>0,428</b>	<b>0,051</b>	<b>0,213</b>	<b>0,053</b>	<b>0,269</b>	<b>0,053</b>	<b>0,510</b>
4	1	0,460	3,440	0,490	3,140	0,510	3,520	0,380	2,740
	2	0,450	3,850	0,500	3,380	0,630	4,150	0,410	2,960
	3	0,550	3,490	0,540	3,720	0,550	5,050	0,480	3,610
	4	0,480	3,110	0,550	3,470	0,580	3,750	0,490	3,040
	5	0,410	3,200	0,570	3,380	0,510	3,400	0,350	2,470
	x□	<b>0,470</b>	<b>3,418</b>	<b>0,530</b>	<b>3,418</b>	<b>0,556</b>	<b>3,974</b>	<b>0,422</b>	<b>2,964</b>
	s	0,051	0,289	0,034	0,209	0,051	0,666	0,061	0,423
	t/2	<b>0,064</b>	<b>0,359</b>	<b>0,042</b>	<b>0,259</b>	<b>0,063</b>	<b>0,827</b>	<b>0,076</b>	<b>0,526</b>
5	1	0,520	3,650	0,520	3,430	0,510	3,940	0,420	3,340
	2	0,520	3,370	0,490	3,060	0,570	3,840	0,420	2,720
	3	0,570	3,960	0,560	3,570	0,490	3,150	0,430	2,810
	4	0,440	3,120	0,500	3,330	0,570	3,860	0,450	3,350
	5	0,490	3,430	0,490	3,230	0,540	4,180	0,440	2,930
	x□	<b>0,508</b>	<b>3,506</b>	<b>0,512</b>	<b>3,324</b>	<b>0,536</b>	<b>3,794</b>	<b>0,432</b>	<b>3,030</b>
	s	0,048	0,316	0,029	0,194	0,036	0,385	0,013	0,297
	t/2	<b>0,059</b>	<b>0,393</b>	<b>0,037</b>	<b>0,241</b>	<b>0,044</b>	<b>0,477</b>	<b>0,016</b>	<b>0,369</b>
6	1	0,600	4,120	0,540	3,580	0,580	3,930	0,540	3,620
	2	0,560	3,780	0,550	3,730	0,550	3,890	0,440	3,110
	3	0,520	3,610	0,530	3,650	0,550	3,960	0,410	2,880
	4	0,600	3,960	0,550	3,330	0,500	3,230	0,510	3,590
	5	0,590	4,050	0,520	3,630	0,570	3,960	0,410	3,090
	x□	<b>0,574</b>	<b>3,904</b>	<b>0,538</b>	<b>3,584</b>	<b>0,550</b>	<b>3,794</b>	<b>0,462</b>	<b>3,258</b>
	s	0,034	0,208	0,013	0,152	0,031	0,317	0,060	0,329
	t/2	<b>0,043</b>	<b>0,258</b>	<b>0,016</b>	<b>0,189</b>	<b>0,038</b>	<b>0,393</b>	<b>0,074</b>	<b>0,409</b>
7	1	0,460	4,090	0,560	4,020	0,600	4,890	0,400	2,960

		Ensaio 1		Ensaio 2		Ensaio 3		Ensaio 4	
Região	Posição	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz
	2	0,460	3,340	0,510	3,350	0,640	4,040	0,480	3,230
	3	0,540	3,720	0,560	3,940	0,520	3,420	0,520	3,000
	4	0,470	3,300	0,490	3,640	0,510	3,100	0,400	2,740
	5	0,470	3,190	0,580	3,990	0,570	4,130	0,450	3,000
	x□	<b>0,480</b>	<b>3,528</b>	<b>0,540</b>	<b>3,788</b>	<b>0,568</b>	<b>3,916</b>	<b>0,450</b>	<b>2,986</b>
	s	0,034	0,372	0,038	0,288	0,054	0,693	0,052	0,174
	t/2	<b>0,042</b>	<b>0,462</b>	<b>0,047</b>	<b>0,357</b>	<b>0,068</b>	<b>0,860</b>	<b>0,065</b>	<b>0,216</b>
8	1	0,520	3,240	0,500	3,440	0,560	3,800	0,380	2,750
	2	0,460	3,230	0,560	3,810	0,610	4,120	0,500	3,670
	3	0,550	3,740	0,590	3,460	0,530	3,580	0,470	3,320
	4	0,450	3,350	0,540	3,770	0,610	4,430	0,410	3,410
	5	0,510	3,680	0,520	3,720	0,540	3,460	0,440	2,810
	x□	<b>0,498</b>	<b>3,448</b>	<b>0,542</b>	<b>3,640</b>	<b>0,570</b>	<b>3,878</b>	<b>0,440</b>	<b>3,192</b>
	s	0,042	0,245	0,035	0,176	0,038	0,398	0,047	0,398
	t/2	<b>0,052</b>	<b>0,304</b>	<b>0,043</b>	<b>0,219</b>	<b>0,047</b>	<b>0,494</b>	<b>0,059</b>	<b>0,494</b>
9	1	0,470	3,240	0,510	3,180	0,640	4,280	0,480	3,300
	2	0,480	3,500	0,510	3,780	0,640	4,390	0,400	2,660
	3	0,530	3,200	0,540	3,950	0,610	4,170	0,440	3,220
	4	0,480	3,520	0,510	3,530	0,660	4,900	0,410	2,820
	5	0,460	3,700	0,560	3,690	0,580	3,880	0,370	2,820
	x□	<b>0,484</b>	<b>3,432</b>	<b>0,526</b>	<b>3,626</b>	<b>0,626</b>	<b>4,324</b>	<b>0,420</b>	<b>2,964</b>
	s	0,027	0,209	0,023	0,292	0,031	0,374	0,042	0,279
	t/2	<b>0,034</b>	<b>0,260</b>	<b>0,029</b>	<b>0,362</b>	<b>0,039</b>	<b>0,464</b>	<b>0,052</b>	<b>0,347</b>
10	1	0,630	4,280	0,500	3,250	0,510	3,710	0,500	3,320
	2	0,740	4,660	0,550	4,030	0,560	4,070	0,580	3,910
	3	0,560	3,900	0,620	3,990	0,620	3,740	0,420	2,670
	4	0,480	3,210	0,640	3,570	0,540	3,970	0,460	3,180
	5	0,650	3,930	0,590	3,920	0,510	3,830	0,470	3,470
	x□	<b>0,612</b>	<b>3,996</b>	<b>0,580</b>	<b>3,752</b>	<b>0,548</b>	<b>3,864</b>	<b>0,486</b>	<b>3,310</b>
	s	0,098	0,537	0,056	0,334	0,045	0,153	0,060	0,451
	t/2	<b>0,121</b>	<b>0,667</b>	<b>0,070</b>	<b>0,415</b>	<b>0,056</b>	<b>0,190</b>	<b>0,074</b>	<b>0,559</b>
11	1	0,640	4,940	0,560	4,560	0,590	4,170	0,420	3,100
	2	0,560	3,630	0,500	4,080	0,560	3,990	0,390	2,630
	3	0,670	4,930	0,560	3,880	0,530	3,660	0,470	3,180
	4	0,500	3,410	0,580	3,660	0,670	4,760	0,520	3,780
	5	0,470	3,890	0,580	3,670	0,540	3,790	0,440	2,850
	x□	<b>0,568</b>	<b>4,160</b>	<b>0,556</b>	<b>3,970</b>	<b>0,578</b>	<b>4,074</b>	<b>0,448</b>	<b>3,108</b>
	s	0,086	0,728	0,033	0,372	0,056	0,430	0,050	0,434
	t/2	<b>0,107</b>	<b>0,903</b>	<b>0,041</b>	<b>0,462</b>	<b>0,070</b>	<b>0,534</b>	<b>0,062</b>	<b>0,538</b>
12	1	0,560	3,860	0,610	4,540	0,630	3,850	0,550	3,560
	2	0,500	3,670	0,600	3,990	0,590	4,080	0,560	3,440



		Ensaio 1		Ensaio 2		Ensaio 3		Ensaio 4	
Região	Posição	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz
	3	0,470	3,380	0,530	3,780	0,660	3,920	0,450	3,190
	4	0,590	3,980	0,520	3,870	0,600	3,830	0,460	3,570
	5	0,670	4,560	0,500	3,090	0,630	4,820	0,520	3,910
	x□	<b>0,558</b>	<b>3,890</b>	<b>0,552</b>	<b>3,854</b>	<b>0,622</b>	<b>4,100</b>	<b>0,508</b>	<b>3,534</b>
	s	0,079	0,438	0,050	0,519	0,028	0,414	0,051	0,260
	t/2	<b>0,098</b>	<b>0,543</b>	<b>0,062</b>	<b>0,645</b>	<b>0,034</b>	<b>0,514</b>	<b>0,063</b>	<b>0,323</b>
13	1	0,540	3,700	0,610	4,440	0,630	4,320	0,520	3,520
	2	0,620	4,360	0,630	3,970	0,620	4,470	0,550	4,060
	3	0,540	4,030	0,660	4,380	0,670	5,150	0,540	4,100
	4	0,640	4,300	0,650	3,940	0,610	4,950	0,470	3,630
	5	0,580	4,000	0,660	4,660	0,640	4,430	0,500	3,680
	x□	<b>0,584</b>	<b>4,078</b>	<b>0,642</b>	<b>4,278</b>	<b>0,634</b>	<b>4,664</b>	<b>0,516</b>	<b>3,798</b>
	s	0,046	0,265	0,022	0,313	0,023	0,364	0,032	0,264
	t/2	<b>0,057</b>	<b>0,329</b>	<b>0,027</b>	<b>0,388</b>	<b>0,029</b>	<b>0,451</b>	<b>0,040</b>	<b>0,328</b>
14	1	0,500	3,790	0,610	4,410	0,610	4,600	0,480	3,520
	2	0,600	4,280	0,610	3,650	0,630	4,740	0,490	3,160
	3	0,470	3,480	0,530	3,940	0,640	4,560	0,440	3,280
	4	0,510	3,400	0,510	3,830	0,590	4,130	0,580	3,890
	5	0,600	4,240	0,590	3,790	0,570	3,790	0,490	3,990
	x□	<b>0,536</b>	<b>3,838</b>	<b>0,570</b>	<b>3,924</b>	<b>0,608</b>	<b>4,364</b>	<b>0,496</b>	<b>3,568</b>
	s	0,060	0,412	0,047	0,291	0,029	0,394	0,051	0,365
	t/2	<b>0,075</b>	<b>0,512</b>	<b>0,058</b>	<b>0,361</b>	<b>0,036</b>	<b>0,489</b>	<b>0,064</b>	<b>0,453</b>
15	1	0,580	3,710	0,630	4,100	0,560	3,900	0,510	3,750
	2	0,610	4,120	0,580	4,040	0,610	4,070	0,530	4,490
	3	0,680	4,300	0,640	4,180	0,610	4,250	0,450	3,200
	4	0,670	4,200	0,500	3,600	0,660	4,390	0,420	3,040
	5	0,650	4,640	0,590	4,150	0,640	4,430	0,450	3,120
	x□	<b>0,638</b>	<b>4,194</b>	<b>0,588</b>	<b>4,014</b>	<b>0,616</b>	<b>4,208</b>	<b>0,472</b>	<b>3,520</b>
	s	0,042	0,335	0,055	0,237	0,038	0,223	0,046	0,610
	t/2	<b>0,052</b>	<b>0,416</b>	<b>0,069</b>	<b>0,295</b>	<b>0,047</b>	<b>0,276</b>	<b>0,057</b>	<b>0,757</b>
16	1	0,510	3,580	0,540	3,770	0,620	4,530	0,500	3,330
	2	0,630	4,430	0,640	4,240	0,620	4,200	0,520	3,380
	3	0,490	3,320	0,550	4,010	0,640	4,230	0,460	3,360
	4	0,550	3,820	0,540	3,280	0,550	3,770	0,660	3,830
	5	0,650	4,390	0,540	3,570	0,640	4,490	0,540	3,400
	x□	<b>0,566</b>	<b>3,908</b>	<b>0,562</b>	<b>3,774</b>	<b>0,614</b>	<b>4,244</b>	<b>0,536</b>	<b>3,460</b>
	s	0,071	0,491	0,044	0,374	0,037	0,304	0,075	0,208
	t/2	<b>0,088</b>	<b>0,610</b>	<b>0,054</b>	<b>0,464</b>	<b>0,046</b>	<b>0,377</b>	<b>0,094</b>	<b>0,259</b>
17	1	0,520	3,960	0,580	3,480	0,650	4,600	0,590	4,450
	2	0,670	4,470	0,600	3,730	0,560	4,200	0,460	3,120
	3	0,520	3,440	0,510	4,200	0,640	4,360	0,500	3,380

		Ensaio 1		Ensaio 2		Ensaio 3		Ensaio 4	
Região	Posição	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz
	4	0,570	4,230	0,530	3,530	0,650	4,500	0,480	3,460
	5	0,530	3,810	0,600	4,700	0,580	4,280	0,470	3,210
	x□	<b>0,562</b>	<b>3,982</b>	<b>0,564</b>	<b>3,928</b>	<b>0,616</b>	<b>4,388</b>	<b>0,500</b>	<b>3,524</b>
	s	0,064	0,395	0,042	0,517	0,043	0,162	0,052	0,535
	t/2	<b>0,079</b>	<b>0,490</b>	<b>0,052</b>	<b>0,642</b>	<b>0,053</b>	<b>0,201</b>	<b>0,065</b>	<b>0,664</b>
18	1	0,620	4,510	0,560	3,850	0,710	5,110	0,490	3,430
	2	0,490	3,500	0,660	4,840	0,660	4,410	0,420	3,370
	3	0,630	4,100	0,590	4,280	0,660	5,010	0,520	3,450
	4	0,630	4,440	0,620	3,810	0,690	5,150	0,450	3,730
	5	0,590	4,130	0,650	4,350	0,660	5,040	0,440	3,120
	x□	<b>0,592</b>	<b>4,136</b>	<b>0,616</b>	<b>4,226</b>	<b>0,676</b>	<b>4,944</b>	<b>0,464</b>	<b>3,420</b>
	s	0,059	0,399	0,042	0,421	0,023	0,304	0,040	0,218
	t/2	<b>0,074</b>	<b>0,496</b>	<b>0,052</b>	<b>0,523</b>	<b>0,029</b>	<b>0,377</b>	<b>0,050</b>	<b>0,270</b>
19	1	0,510	3,440	0,680	4,410	0,620	4,090	0,500	3,800
	2	0,510	3,320	0,630	4,160	0,670	5,180	0,510	3,460
	3	0,520	3,600	0,630	3,960	0,660	4,910	0,480	3,410
	4	0,590	3,890	0,570	4,020	0,620	4,630	0,610	3,890
	5	0,520	3,640	0,690	4,540	0,590	4,190	0,560	3,510
	x□	<b>0,530</b>	<b>3,578</b>	<b>0,640</b>	<b>4,218</b>	<b>0,632</b>	<b>4,600</b>	<b>0,532</b>	<b>3,614</b>
	s	0,034	0,216	0,048	0,250	0,033	0,464	0,053	0,216
	t/2	<b>0,042</b>	<b>0,269</b>	<b>0,060</b>	<b>0,310</b>	<b>0,041</b>	<b>0,576</b>	<b>0,065</b>	<b>0,268</b>
20	1	0,620	4,590	0,580	3,830	0,690	4,910	0,520	3,670
	2	0,580	5,100	0,570	3,920	0,680	4,270	0,620	3,790
	3	0,530	3,630	0,590	4,830	0,640	4,020	0,580	3,830
	4	0,580	4,010	0,560	4,080	0,680	4,580	0,610	4,060
	5	0,560	3,800	0,520	3,750	0,660	4,760	0,500	3,400
	x□	<b>0,574</b>	<b>4,226</b>	<b>0,564</b>	<b>4,082</b>	<b>0,670</b>	<b>4,508</b>	<b>0,566</b>	<b>3,750</b>
	s	0,033	0,608	0,027	0,436	0,020	0,362	0,054	0,241
	t/2	<b>0,041</b>	<b>0,755</b>	<b>0,034</b>	<b>0,541</b>	<b>0,025</b>	<b>0,450</b>	<b>0,067</b>	<b>0,300</b>
21	1	0,660	4,540	0,580	3,830	0,630	4,470	0,460	3,230
	2	0,650	4,180	0,620	4,450	0,690	4,860	0,580	3,890
	3	0,610	4,050	0,670	4,440	0,620	4,400	0,540	4,210
	4	0,530	3,390	0,580	4,400	0,640	4,080	0,430	2,950
	5	0,540	3,850	0,560	3,920	0,700	5,090	0,450	3,200
	x□	<b>0,598</b>	<b>4,002</b>	<b>0,602</b>	<b>4,208</b>	<b>0,656</b>	<b>4,580</b>	<b>0,492</b>	<b>3,496</b>
	s	0,061	0,425	0,044	0,306	0,036	0,398	0,065	0,530
	t/2	<b>0,075</b>	<b>0,527</b>	<b>0,054</b>	<b>0,380</b>	<b>0,045</b>	<b>0,494</b>	<b>0,080</b>	<b>0,657</b>
22	1	0,640	4,560	0,690	5,170	0,650	4,550	0,720	4,570
	2	0,630	3,710	0,530	3,640	0,700	4,710	0,540	3,550
	3	0,690	4,640	0,630	4,640	0,750	5,290	0,450	3,120
	4	0,540	4,650	0,560	3,350	0,670	4,410	0,540	3,960

		Ensaio 1		Ensaio 2		Ensaio 3		Ensaio 4	
Região	Posição	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz
	5	0,580	4,390	0,630	4,470	0,740	5,170	0,530	3,620
	x□	<b>0,616</b>	<b>4,390</b>	<b>0,608</b>	<b>4,254</b>	<b>0,702</b>	<b>4,826</b>	<b>0,556</b>	<b>3,764</b>
	s	0,058	0,394	0,063	0,746	0,043	0,386	0,099	0,541
	t/2	<b>0,072</b>	<b>0,489</b>	<b>0,079</b>	<b>0,927</b>	<b>0,054</b>	<b>0,479</b>	<b>0,123</b>	<b>0,671</b>
23	1	0,620	4,420	0,650	4,070	0,660	4,550	0,480	3,520
	2	0,580	3,660	0,570	4,380	0,690	4,720	0,500	3,790
	3	0,630	4,670	0,610	4,320	0,700	4,870	0,460	3,400
	4	0,540	3,570	0,570	4,480	0,710	5,370	0,550	3,910
	5	0,530	3,920	0,590	4,280	0,630	4,420	0,490	3,670
	x□	<b>0,580</b>	<b>4,048</b>	<b>0,598</b>	<b>4,306</b>	<b>0,678</b>	<b>4,786</b>	<b>0,496</b>	<b>3,658</b>
	s	0,045	0,480	0,033	0,152	0,033	0,368	0,034	0,204
	t/2	<b>0,056</b>	<b>0,596</b>	<b>0,042</b>	<b>0,189</b>	<b>0,041</b>	<b>0,457</b>	<b>0,042</b>	<b>0,253</b>
24	1	0,620	5,180	0,560	4,090	0,670	4,920	0,660	5,310
	2	0,670	4,760	0,520	3,460	0,690	5,100	0,670	4,920
	3	0,530	3,650	0,640	4,810	0,700	4,730	0,480	3,260
	4	0,690	4,560	0,620	4,000	0,740	4,870	0,630	4,060
	5	0,530	3,780	0,530	3,740	0,580	4,300	0,470	3,210
	x□	<b>0,608</b>	<b>4,386</b>	<b>0,574</b>	<b>4,020</b>	<b>0,676</b>	<b>4,784</b>	<b>0,582</b>	<b>4,152</b>
	s	0,076	0,654	0,054	0,505	0,059	0,301	0,099	0,952
	t/2	<b>0,094</b>	<b>0,812</b>	<b>0,067</b>	<b>0,627</b>	<b>0,074</b>	<b>0,374</b>	<b>0,123</b>	<b>1,181</b>
25	1	0,680	4,960	0,680	5,100	0,770	5,170	0,690	4,670
	2	0,580	4,220	0,670	4,900	0,780	5,560	0,590	4,070
	3	0,630	4,430	0,560	4,120	0,720	4,930	0,550	4,060
	4	0,600	3,920	0,560	4,150	0,630	4,120	0,720	4,400
	5	0,680	4,730	0,680	5,210	0,730	5,030	0,730	5,050
	x□	<b>0,634</b>	<b>4,452</b>	<b>0,630</b>	<b>4,696</b>	<b>0,726</b>	<b>4,962</b>	<b>0,656</b>	<b>4,450</b>
	s	0,046	0,410	0,064	0,524	0,059	0,528	0,081	0,421
	t/2	<b>0,057</b>	<b>0,509</b>	<b>0,079</b>	<b>0,651</b>	<b>0,074</b>	<b>0,656</b>	<b>0,101</b>	<b>0,522</b>
26	1	0,620	4,320	0,690	4,550	0,640	4,860	0,600	4,160
	2	0,590	4,080	0,670	5,210	0,710	5,790	0,580	3,990
	3	0,620	4,130	0,650	3,940	0,690	5,170	0,530	3,940
	4	0,510	3,960	0,660	3,970	0,680	4,950	0,620	4,650
	5	0,710	4,940	0,600	4,130	0,680	4,600	0,480	3,330
	x□	<b>0,610</b>	<b>4,286</b>	<b>0,654</b>	<b>4,360</b>	<b>0,680</b>	<b>5,074</b>	<b>0,562</b>	<b>4,014</b>
	s	0,072	0,388	0,034	0,534	0,025	0,449	0,057	0,474
	t/2	<b>0,089</b>	<b>0,482</b>	<b>0,042</b>	<b>0,663</b>	<b>0,032</b>	<b>0,558</b>	<b>0,070</b>	<b>0,589</b>
27	1	0,700	4,850	0,640	4,510	0,660	4,520	0,700	5,270
	2	0,730	5,010	0,570	3,930	0,760	5,330	0,720	5,050
	3	0,640	4,230	0,720	4,720	0,720	4,680	0,530	3,470
	4	0,750	4,870	0,650	4,580	0,690	5,450	0,670	4,170
	5	0,630	3,860	0,540	3,900	0,640	4,490	0,580	3,770

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação  
em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de  
Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Walter Lindolfo Weingaertner, Dr.-Ing.

Florianópolis, 2012

		Ensaio 1		Ensaio 2		Ensaio 3		Ensaio 4	
Região	Posição	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz
	x□	<b>0,690</b>	<b>4,564</b>	<b>0,624</b>	<b>4,328</b>	<b>0,694</b>	<b>4,894</b>	<b>0,640</b>	<b>4,346</b>
	s	0,053	0,495	0,071	0,385	0,048	0,460	0,082	0,787
	t/2	<b>0,066</b>	<b>0,615</b>	<b>0,088</b>	<b>0,478</b>	<b>0,059</b>	<b>0,572</b>	<b>0,101</b>	<b>0,977</b>
28	1	0,590	4,260	0,630	4,900	0,700	5,330	0,570	3,910
	2	0,570	3,600	0,690	4,950	0,680	4,960	0,530	4,090
	3	0,840	4,970	0,600	4,020	0,660	5,020	0,540	4,060
	4	0,750	5,740	0,680	5,260	0,710	4,530	0,590	4,320
	5	0,660	4,500	0,650	4,440	0,640	4,640	0,630	4,660
	x□	<b>0,682</b>	<b>4,614</b>	<b>0,650</b>	<b>4,714</b>	<b>0,678</b>	<b>4,896</b>	<b>0,572</b>	<b>4,208</b>
	s	0,113	0,800	0,037	0,486	0,029	0,319	0,040	0,292
	t/2	<b>0,140</b>	<b>0,993</b>	<b>0,046</b>	<b>0,603</b>	<b>0,036</b>	<b>0,396</b>	<b>0,050</b>	<b>0,363</b>
29	1	0,550	3,410	0,630	4,770	0,730	5,550	0,650	5,270
	2	0,650	4,830	0,720	5,810	0,630	4,270	0,690	4,980
	3	0,660	4,510	0,600	4,130	0,680	4,520	0,490	4,430
	4	0,650	4,480	0,610	4,290	0,690	4,360	0,530	3,510
	5	0,650	4,330	0,650	4,480	0,760	5,080	0,550	3,650
	x□	<b>0,632</b>	<b>4,312</b>	<b>0,642</b>	<b>4,696</b>	<b>0,698</b>	<b>4,756</b>	<b>0,582</b>	<b>4,368</b>
	s	0,046	0,536	0,048	0,667	0,050	0,544	0,084	0,782
	t/2	<b>0,057</b>	<b>0,666</b>	<b>0,059</b>	<b>0,828</b>	<b>0,062</b>	<b>0,675</b>	<b>0,105</b>	<b>0,970</b>
30	1	0,630	4,250	0,620	4,270	0,660	4,880	0,550	3,700
	2	0,730	5,070	0,600	3,980	0,640	4,540	0,620	4,160
	3	0,670	4,620	0,740	5,520	0,680	4,540	0,640	4,870
	4	0,760	4,610	0,720	4,400	0,640	4,490	0,580	4,000
	5	0,510	3,560	0,630	4,250	0,660	4,840	0,640	5,280
	x□	<b>0,660</b>	<b>4,422</b>	<b>0,662</b>	<b>4,484</b>	<b>0,656</b>	<b>4,658</b>	<b>0,606</b>	<b>4,402</b>
	s	0,098	0,563	0,063	0,599	0,017	0,186	0,040	0,652
	t/2	<b>0,122</b>	<b>0,699</b>	<b>0,079</b>	<b>0,744</b>	<b>0,021</b>	<b>0,231</b>	<b>0,049</b>	<b>0,810</b>
31	1	0,660	4,820	0,610	4,450	0,640	4,480	0,560	3,840
	2	0,700	4,850	0,590	5,150	0,680	4,870	0,690	5,130
	3	0,670	4,660	0,640	4,730	0,720	5,530	0,630	4,780
	4	0,620	4,290	0,770	5,220	0,720	5,620	0,700	4,710
	5	0,580	3,610	0,610	3,950	0,650	4,230	0,620	4,120
	x□	<b>0,646</b>	<b>4,446</b>	<b>0,644</b>	<b>4,700</b>	<b>0,682</b>	<b>4,946</b>	<b>0,640</b>	<b>4,516</b>
	s	0,047	0,518	0,073	0,524	0,038	0,619	0,057	0,524
	t/2	<b>0,058</b>	<b>0,643</b>	<b>0,090</b>	<b>0,651</b>	<b>0,047</b>	<b>0,768</b>	<b>0,071</b>	<b>0,650</b>
32	1	0,620	4,090	0,610	3,980	0,730	5,050	0,600	4,760
	2	0,590	4,390	0,670	4,500	0,910	6,170	0,640	4,030
	3	0,600	4,660	0,680	5,320	0,960	6,380	0,620	4,390
	4	0,660	4,630	0,730	4,910	0,870	6,940	0,640	4,370
	5	0,580	3,670	0,580	3,810	0,650	4,480	0,530	3,710
	x□	<b>0,610</b>	<b>4,288</b>	<b>0,654</b>	<b>4,504</b>	<b>0,824</b>	<b>5,804</b>	<b>0,606</b>	<b>4,252</b>

		Ensaio 1		Ensaio 2		Ensaio 3		Ensaio 4	
Região	Posição	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz
	s	0,032	0,414	0,059	0,630	0,130	1,010	0,046	0,398
	t/2	0,039	0,514	0,074	0,782	0,161	1,253	0,057	0,494
33	1	0,710	4,920	0,620	4,060	0,830	5,360	0,610	4,920
	2	0,620	4,460	0,720	4,900	0,650	4,840	0,630	4,770
	3	0,600	4,020	0,720	5,590	0,760	5,740	0,730	5,190
	4	0,530	3,730	0,660	5,160	0,790	5,480	0,570	3,860
	5	0,760	4,980	0,630	4,690	0,860	6,110	0,560	4,030
	x□	0,644	4,422	0,670	4,880	0,778	5,506	0,620	4,554
	s	0,091	0,548	0,048	0,568	0,081	0,470	0,068	0,579
	t/2	0,113	0,680	0,060	0,705	0,101	0,584	0,084	0,719
34	1	0,710	4,590	0,540	3,890	0,790	5,490	0,660	4,890
	2	0,730	4,750	0,670	4,480	0,660	4,990	0,540	3,770
	3	0,770	4,670	0,650	4,490	0,720	5,070	0,610	3,540
	4	0,740	5,990	0,590	4,130	0,740	4,910	0,620	4,350
	5	0,610	4,210	0,600	4,350	0,680	4,470	0,730	5,120
	x□	0,712	4,842	0,610	4,268	0,718	4,986	0,632	4,334
	s	0,061	0,674	0,051	0,256	0,051	0,365	0,070	0,685
	t/2	0,076	0,837	0,064	0,318	0,064	0,453	0,087	0,850
Dressado	1	0,440	2,960	0,400	3,250	0,450	3,390	0,350	2,280
	2	0,400	2,770	0,410	2,910	0,440	2,890	0,370	2,560
	3	0,420	2,800	0,400	2,730	0,450	3,300	0,370	2,600
	4	0,450	3,300	0,420	2,860	0,400	2,790	0,250	1,790
	5	0,470	3,040	0,460	3,070	0,440	3,190	0,320	2,260
	x□	0,436	2,974	0,418	2,964	0,436	3,112	0,332	2,298
	s	0,027	0,214	0,025	0,201	0,021	0,261	0,050	0,324
	t/2	0,034	0,265	0,031	0,249	0,026	0,324	0,062	0,402
Desgaste	1	0,550	4,030	0,640	4,560	0,590	4,520	0,570	4,490
	2	0,630	4,520	0,640	4,990	0,810	6,090	0,640	4,990
	3	0,510	4,130	0,610	4,440	0,630	4,520	0,520	3,610
	4	0,550	3,720	0,600	4,650	0,650	5,160	0,540	3,490
	5	0,600	4,120	0,590	3,940	0,610	4,310	0,450	3,120
	x□	0,568	4,104	0,616	4,516	0,658	4,920	0,544	3,940
	s	0,047	0,286	0,023	0,381	0,088	0,728	0,069	0,773
	t/2	0,058	0,355	0,029	0,474	0,109	0,904	0,086	0,959